

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11)特許出願公開番号
特開2000-236299
(P2000-236299A)

(43)公開日 平成12年 8月29日 (2000. 8. 29)

(51)Int.Cl.⁷
H 0 4 B 10/02
10/18
H 0 4 J 14/00
14/02

識別記号

F I
H 0 4 B 9/00

テーマコード(参考)
M 5 K 0 0 2
E

審査請求 未請求 請求項の数65 O L (全 56 頁)

(21)出願番号	特願平11-216737	(71)出願人	000005223 富士通株式会社 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号
(22)出願日	平成11年 7月30日 (1999. 7. 30)	(72)発明者	秋山 祐一 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内
(31)優先権主張番号	特願平10-360083	(72)発明者	石川 丈二 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内
(32)優先日	平成10年12月18日 (1998. 12. 18)	(74)代理人	100084711 弁理士 齊藤 千幹
(33)優先権主張国	日本 (J P)		

最終頁に続く

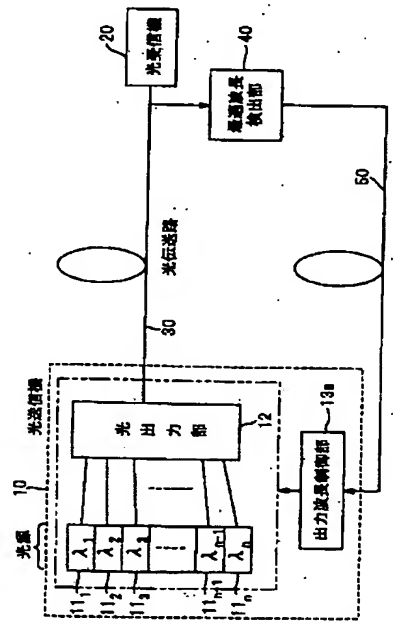
(54)【発明の名称】 光送信機及び光伝送システム

(57)【要約】

【課題】 波長可変レーザを用いなくても、光伝送路の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長の光を光伝送路に出力して分散補償する。

【解決手段】 それぞれ異なる波長の光を出力する複数の光源 1 1₁～1 1_nを設け、光伝送システムの運用開始前に、光伝送路 3 0の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長を検出するために該光伝送路に出力する光の波長を変化し、システム運用中、検出された最適波長の光を光伝送路に出力する。

本発明の第1の原理説明図



【特許請求の範囲】

【請求項1】 波長分散補償機能を備えた光送信機において、

それぞれ異なる波長の光を出力する複数の光源、
前記複数の光源から出力する光のうち、光伝送路の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長を有する光を該光伝送路に出力する手段、
を備えたことを特徴とする光送信機。

【請求項2】 前記複数の光源として半導体アレイレーザを用いることを特徴とする請求項1記載の光送信機。

【請求項3】 前記複数の光源として複数の単体の半導体レーザを用いることを特徴とする請求項1記載の光送信機。

【請求項4】 前記光出力手段は、前記複数の光源から出力する光のうち、光伝送路の波長分散値が零になる零分散波長に最近の波長を有する光を光伝送路に出力することを特徴とする請求項1または請求項2または請求項3記載の光送信機。

【請求項5】 波長分散補償機能を備えた光送信機において、

それぞれ異なる波長の光を出力する複数の光源、
前記複数の光源から出力する光のうち、光伝送路の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長を有する光を該光伝送路に出力する手段、
光源から発生する光を切り替えて光伝送路に出力することにより、光伝送路に出力する光の波長を変化する手段を備え、

光伝送システムの運用開始前に、光伝送路の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長を検出するために該光伝送路に出力する光の波長を変化し、システム運用中、検出された最適波長の光を光伝送路に出力することを特徴とする光送信機。

【請求項6】 光伝送路の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長を検出する波長検出手段を設け、該波長検出手段により検出された最適波長の光を光伝送路に出力することを特徴とする請求項1記載の光送信機。

【請求項7】 前記波長検出手段は、受信したベースバンドスペクトル信号中の特定周波数成分強度に基づいて前記最適波長を検出することを特徴とする請求項6記載の送信機。

【請求項8】 前記特定周波数は、データのビットレート周波数である請求項7記載の送信機。

【請求項9】 各光源の後段にそれぞれ配置された光減衰器を備え、

前記波長可変手段は、各光減衰器の光減衰量を制御することにより光伝送路に出力する光の波長を変化することを特徴とする請求項5記載の光送信機。

【請求項10】 前記光出力手段は、各光源から発生する光を合波する合波手段、所望の波長を選択して出力する波長可変フィルタを備え、

前記波長可変手段は、該波長可変フィルタを制御することにより光伝送路に出力する光の波長を変化することを特徴とする請求項5記載の光送信機。

【請求項11】 前記最適波長は光伝送路の零分散波長であり、システム運用中、前記光出力手段は、前記複数の光源から出力する光のうち、零分散波長に最近の波長を有する光を光伝送路に出力することを特徴とする請求項5記載の光送信機。

【請求項12】 波長分散補償機能を備えた光送信機において、

それぞれ異なる波長の光を出力する複数の光源、
前記複数の光源から発生する光を切り替えて光伝送路に出力する光の波長を変化すると共に、光伝送路の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長の光を選択して出力する光出力手段、

前記光出力手段より出力する光を送信データにより変調して光伝送路に送出する変調部を備え、

前記変調部は、受信側の受信ベースバンドスペクトル信号に含まれる特定周波数成分強度が零分散波長において極値を示すように変調し、

前記光出力手段は、光伝送システムの運用開始前、零分散波長あるいは該零分散波長に最近の波長を検出するために、光伝送路に出力する光の波長を変化し、システム運用中、該零分散波長あるいは該零分散波長に最近の波長を有する光を主信号光として出力することを特徴とする光送信機。

【請求項13】 前記変調部は、零分散波長の光を変調した時、受信側の受信ベースバンドスペクトル信号に含まれる特定周波数成分強度が最小値となるように変調することを特徴とする請求項12記載の光送信機。

【請求項14】 前記変調部は、零分散波長の光を変調した時、受信側の受信ベースバンドスペクトル信号に含まれる特定周波数成分強度が最大値となるように変調することを特徴とする請求項12記載の光送信機。

【請求項15】 波長分散補償機能を備えた光送信機において、

それぞれ異なる波長の光を出力する複数の光源、
前記複数の光源から出力する光のうち、光伝送路の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長を有する光を該光伝送路に出力する手段、

光伝送路の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長を検出するために、光伝送路に出力する光の波長を変動させる手段を備え、

光伝送システムの運用中に検出された前記最適波長の光を光伝送路に出力することを特徴とする光送信機。

【請求項16】 光源から発生する光を切り替えて光伝送路に出力することにより、該光伝送路に出力する光の波長を変化する波長可変手段を備え、

光伝送システムの運用開始前に、光伝送路の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長を決定するために光伝

送路に出力する光の波長を変化し、システム運用時に該最適波長の光を光伝送路に出力すると共に、光の波長を変動することを特徴とする請求項15記載の光送信機。

【請求項17】 光伝送路の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長を検出する波長検出手段を設け、該波長検出手段により検出された最適波長の光を光伝送路に出力することを特徴とする請求項15記載の光送信機。

【請求項18】 前記波長検出手段は、受信したベースバンドスペクトル信号中の特定周波数成分強度に基づいて前記最適波長を検出することを特徴とする請求項17記載の送信機。

【請求項19】 前記最適波長は光伝送路の零分散波長であり、前記光出力手段は、前記複数の光源から出力する光のうち零分散波長に最近の波長を有する光を光伝送路に出力することを特徴とする請求項15記載の光送信機。

【請求項20】 光伝送路に出力する光を発生する光源と該光源に隣接する光源の中間波長に零分散波長がシフトした時、光伝送路に出力する光を現光源から該隣接光源に瞬断なく切り替える光源切替手段、を備えたことを特徴とする請求項19記載の光送信機。

【請求項21】 現光源への電流注入量を漸減し、隣接する光源への電流注入量を漸増することにより瞬断なく切り替えることを特徴とする請求項20記載の光送信機。

【請求項22】 光伝送路に出力する光を現光源から該隣接光源に切り替える際、現光源と隣接光源からの光を同時に光伝送路に出力し、ついで、現光源からの光伝送路への光出力を停止することを特徴とする請求項20記載の光送信機。

【請求項23】 各光源の後段にそれぞれ光減衰器を配置し、

前記波長可変手段は、各光減衰器の光減衰量を制御することにより光伝送路に出力する光の波長を変化することを特徴とする請求項25又請求項26記載の光送信機。

【請求項24】 前記光出力手段は、各光源から発生する光を合波する合波手段、所望の波長を選択して出力する波長可変フィルタを備え、

前記波長可変手段は、該波長可変フィルタを制御することにより光伝送路に出力する光の波長を変化することを特徴とする請求項25または請求項26記載の光送信機。

【請求項25】 波長分散補償機能を備えた光送信機において、

それぞれ異なる波長の光を出力する複数の光源、

前記複数の光源から出力する光のうち、光伝送路の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長を有する光を主信号光として該光伝送路に出力する手段、

光伝送路の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長を検出するためのモニタ光を前記主信号光に合波する手

段を備え、

光伝送システムの運用中にモニタ光を主信号光に合波し、検出された最適波長の光を光伝送路に主信号光として出力することを特徴とする光送信機。

【請求項26】 光源から発生する光を切り替えて光伝送路に出力することにより、該光伝送路に出力する光の波長を変化する波長可変手段を備え、

システムの運用開始前に、光伝送路の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長を決定するために光伝送路に出力する光の波長を変化し、システム運用中、該最適波長の光を主信号光として光伝送路に出力することを特徴とする請求項25記載の光送信機。

【請求項27】 前記光出力手段は、前記複数の光源から出力する光のうち最適波長に最近の波長を有する光を主信号光として光伝送路に出力することを特徴とする請求項25記載の光送信機。

【請求項28】 光伝送路に出力する主信号光を発生する光源と該光源に隣接するモニタ光を発生する光源の中間波長に零分散波長がシフトした時、主信号光を現光源から該隣接光源に瞬断なく切り替える手段、

を備えたことを特徴とする請求項27記載の光送信機。

【請求項29】 現光源への電流注入量を漸減し、隣接する光源への電流注入量を漸増することにより瞬断なく切り替えることを特徴とする請求項28記載の光送信機。

【請求項30】 光伝送路に出力する光を現光源から該隣接光源に切り替える際、現光源と隣接光源からの光を同時に光伝送路に出力し、ついで、現光源からの光伝送路への光出力を停止することを特徴とする請求項28記載の光送信機。

【請求項31】 各光源の後段にそれぞれ配置された光減衰器を備え、

前記波長可変手段は、各光減衰器の光減衰量を制御することにより光伝送路に出力する光の波長を変化することを特徴とする請求項25または請求項26記載の光送信機。

【請求項32】 前記光出力手段は、各光源から発生する光を合波する合波手段、所望の波長を選択して出力する波長可変フィルタを備え、

前記波長可変手段は、該波長可変フィルタを制御することにより光伝送路に出力する光の波長を変化することを特徴とする請求項25または請求項26記載の光送信機。

【請求項33】 信号光とモニター光の偏波を直交させる手段、

信号光とモニター光の偏波状態を保持する手段、

を備えた請求項請求項25または26記載の光送信機。

【請求項34】 前記モニタ光は、主信号光を発生する光源に対して波長に関して隣接する光源が発生する光であることを特徴とする請求項25記載の光送信機。

【請求項35】 前記モニタ光は主信号光を発生する光源に対して波長に関して充分離れた光源が発生する光であることを特徴とする請求項25記載の光送信機。

【請求項36】 前記モニタ光は波長分散モニタ専用の光源が発生する光であることを特徴とする請求項25記載の光送信機。

【請求項37】 光伝送路の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長を検出する波長検出手段を設け、該波長検出手段により検出された最適波長の光を主信号光として光伝送路に出力することを特徴とする請求項25または請求項26記載の光送信機。

【請求項38】 前記波長検出手段は、受信したベースバンドスペクトル信号中の特定周波数成分強度に基づいて前記最適波長を検出することを特徴とする請求項37記載の送信機。

【請求項39】 波長分散補償機能を備えた光伝送システムにおいて、それぞれ異なる波長の光を発生する複数の光源、前記複数の光源から発生する光のうち所定の光を光伝送路に出力する手段、光源から発生する光を切り替えて光伝送路に出力することにより、該光伝送路に出力する光の波長を変化する波長可変手段、光伝送路の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長を検出する波長検出手段を備え、光伝送システムの運用開始前に、該光伝送路に出力する光の波長を変化して光伝送路の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長を検出し、システム運用中、検出された最適波長の光を光伝送路に出力することを特徴とする光伝送システム。

【請求項40】 前記最適波長は零分散波長であり、前記光出力手段は、前記複数の光源から出力する光のうち、零分散波長に最近の波長を有する光を光伝送路に出力することを特徴とする請求項39記載の光送信機。

【請求項41】 波長分散補償機能を備えた光伝送システムにおいて、それぞれ異なる波長の光を発生する複数の光源、前記複数の光源から発生する光のうち所定の光を光伝送路に出力する光出力手段、光出力手段を制御して光源から発生する光を切り替え、光伝送路に出力する光の波長を変化する波長可変手段、受信光のベースバンドスペクトル信号に含まれる特定周波数成分強度に基づいて光伝送路の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長を検出する最適波長検出手段を備え、システムの運用開始前に、波長可変手段は光源から発生する光を切り替え制御して光伝送路に出力する光の波長を変化し、最適波長検出手段は受信光のベースバンドスペクトル信号に含まれる特定周波数成分強度が最小となる波長を最適波長として検出し、

システム運用中、検出された最適波長の光を光伝送路に出力することを特徴とする光伝送システム。

【請求項42】 波長分散補償機能を備えた光伝送システムにおいて、それぞれ異なる波長の光を発生する複数の光源、前記複数の光源から発生する光のうち所定の光を光伝送路に出力する光出力手段、光出力手段を制御して光源から発生する光を切り替え、光伝送路に出力する光の波長を変化する波長可変手段、受信光のベースバンドスペクトル信号に含まれる特定周波数成分強度に基づいて光伝送路の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長を検出する最適波長検出手段、最適波長検出手段の前段に設けられ、特定周波数成分強度が最大となる波長と最小となる波長との波長差に応じた分散を受信光に付与する分散付与部を備え、システムの運用開始前に、波長可変手段は光源から発生する光を切り替えて光伝送路に出力する光の波長を変化し、最適波長検出手段は分散付与部を介して入力する受信光のベースバンドスペクトル信号に含まれる特定周波数成分強度が最大となる波長 λ_m を検出し、システム運用中、分散付与部を介して最適波長検出手段に入力する光の波長が λ_m となるような波長を有する光を光伝送路に出力することを特徴とする光伝送システム。

【請求項43】 前記分散付与部の出力側よりデータ受信に必要なビットレート周波数信号を発生することを特徴とする請求項42記載の光伝送システム。

【請求項44】 波長分散補償機能を備えた光伝送システムにおいて、それぞれ異なる波長の光を発生する複数の光源、前記複数の光源から発生する光のうち所定の光を光伝送路に出力する光出力手段、光出力手段を制御して光源から発生する光を切り替え、光伝送路に出力する光の波長を変化する波長可変手段、受信光のベースバンドスペクトル信号に含まれる特定周波数成分強度に基づいて光伝送路の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長を検出する最適波長検出手段を備え、システムの運用開始前に、波長可変手段は光源から発生する光を切り替えて光伝送路に出力する光の波長を変化し、最適波長検出手段は受信光のベースバンドスペクトル信号に含まれる特定周波数成分強度が最大となる波長を最適波長として検出し、システム運用中、検出された最適波長の光を光伝送路に出力することを特徴とする光伝送システム。

【請求項45】 波長分散補償機能を備えた光伝送システムにおいて、それぞれ異なる波長の光を発生する複数の光源、前記複数の光源から発生する光のうち所定の光を光伝送路に出力する光出力手段、

光出力手段を制御して光源から発生する光を切り替え、光伝送路に出力する光の波長を変化する波長可変手段、受信光のベースバンドスペクトル信号に含まれる特定周波数成分強度に基づいて光伝送路の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長を検出する最適波長検出手段、最適波長検出手段の前段に設けられ、特定周波数成分強度が最小となる波長と最大となる波長との波長差に応じた分散を受信光に付与する分散付与部を備え、システムの運用開始前に、波長可変手段は光源から発生する光を切り替えて光伝送路に出力する光の波長を変化し、最適波長検出手段は分散付与部を介して入力する受信光のベースバンドスペクトル信号に含まれる特定周波数成分強度が最小となる波長 λ_{\min} を検出し、システム運用中、分散付与部を介して最適波長検出手段に入力する光の波長が λ_{\min} となるような波長を有する光を光伝送路に出力することを特徴とする光伝送システム。

【請求項46】 波長分散補償機能を備えた光伝送システムにおいて、それぞれ異なる波長の光を発生する複数の光源、前記複数の光源から発生する光のうち所定の光を光伝送路に出力する手段、光源から発生する光を切り替えて光伝送路に出力することにより、該光伝送路に出力する光の波長を変化する波長可変手段、光伝送路の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長を検出するために、光伝送路に出力する光の波長を変動させる手段、光伝送路の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長を検出する波長検出手段を備え、システムの運用開始前に、光源から発生する光を切り替えて光伝送路に出力する光の波長を変化して伝送特性が最適になる波長を検出し、システム運用中、該検出された最適波長の光を光伝送路に出力すると共に該光の波長を変動してシステム運用中の最適波長を検出し、該最適波長を有する光の光伝送路への出力及び該最適波長の変動制御を行うことを特徴とする光伝送システム。

【請求項47】 前記最適波長は零分散波長であり、前記光出力手段は、前記複数の光源から出力する光のうち、零分散波長に最近の波長を有する光を光伝送路に出力することを特徴とする請求項46記載の光送信機。

【請求項48】 波長分散補償機能を備えた光伝送システムにおいて、それぞれ異なる波長の光を発生する複数の光源、前記複数の光源から発生する光のうち所定の光を主信号光として光伝送路に出力する手段、光源から発生する光を切り替えて光伝送路に出力することにより、該光伝送路に出力する光の波長を変化する波長可変手段、

光伝送路の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長を検出するためのモニタ光を前記主信号光に合波する手段、

光伝送路の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長を検出する波長検出手段を備え、

システムの運用開始前に、光源から発生する光を切り替えて光伝送路に出力する光の波長を変化して伝送特性が最適になる波長を検出し、システム運用時に該検出された最適波長の光を光伝送路に主信号光として出力すると共にモニタ光を該主信号光に合波し、

システム運用中の最適波長を検出し、該最適波長の光を新たな主信号光として光伝送路へ出力すると共に、該主信号光にモニタ光を合波することを特徴とする光伝送システム。

【請求項49】 前記最適波長は零分散波長であり、前記光出力手段は、前記複数の光源から出力する光のうち、零分散波長に最近の波長を有する光を光伝送路に出力することを特徴とする請求項47記載の光伝送システム。

【請求項50】 前記波長検出手段は、システム運用前において、受信したベースバンドスペクトル信号中の特定周波数成分強度に基づいて前記最適波長を検出すること特徴とする請求項49記載の光伝送システム。

【請求項51】 前記波長検出手段は、システム運用中、受信した主信号光のベースバンドスペクトル信号中の特定周波数成分強度とモニタ光のベースバンドスペクトル信号中の特定周波数成分強度とから、(1) 零分散波長の変動方向、(2) 該零分散波長が主信号光の光源と隣接光源の間波長にシフトしたこと、を検出することを特徴とする請求項49記載の光伝送システム。

【請求項52】 現光源と隣接光源の間波長に零分散波長がシフトした時、主信号光を現光源から該隣接光源に瞬断なく切り替える手段、を備えたことを特徴とする請求項47記載の光伝送システム。

【請求項53】 波長分散補償機能を備えた光伝送システムにおいて、

それぞれ異なる波長の光を発生する複数の光源、前記複数の光源から発生する光のうち所定の波長を有する光を主信号光として光伝送路に出力する手段、光源から発生する光を切り替えて光伝送路に出力することにより該光伝送路に出力する光の波長を変化する波長可変手段、

光伝送路の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長を検出するために、所定の光源から発生する光をモニタ光として選択し、前記主信号光に合波する手段、主信号光及びモニタ光にそれぞれ含まれる特定周波数成分強度の比が所定値になったことで主信号光の切替時期を検出する波長切り替え検出手段、を備えることを特徴とする光伝送システム。

【請求項54】 主信号光の切替に際して、モニタ光を主信号光に、主信号光をモニタ光に切り替えることを特徴とする請求項53記載の光伝送システム。

【請求項55】 波長切り替え検出手段は、主信号光及びモニタ光にそれぞれ含まれる特定周波数成分強度に基づいて零分散波長の変動方向及び零分散波長の波長範囲を検出し、主信号光及びモニタ光の波長をそれぞれ λ_m 、 λ_s とすると、零分散波長が $\lambda_m \sim \lambda_s$ の波長範囲から外れたことでモニタ光の切替時期を検出することを特徴とする請求項54記載の光伝送システム。

【請求項56】 波長分散補償機能を備えた光伝送システムにおいて、それぞれ異なる波長の光を発生する複数の光源、前記複数の光源から発生する光のうち所定の波長を有する光を主信号光として光伝送路に出力する手段、光源から発生する光を切り替えて光伝送路に出力することにより該光伝送路に出力する光の波長を変化する波長可変手段、光伝送路の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長を検出するために、2つの光源から発生する光をモニタ光として選択し、前記主信号光に合波する手段、主信号光及び2つのモニタ光にそれぞれ含まれる特定周波数成分強度を比較することにより最適波長が含まれる波長範囲を検出し、最適波長を挟んだ2波長の強度比が所定値になったことで主信号光の切替時期を検出する波長切り替え検出手段、を備えることを特徴とする光伝送システム。

【請求項57】 主信号光の切替に際して、モニタ光を主信号光に、主信号光をモニタ光に切り替えることを特徴とする請求項53記載の光伝送システム。

【請求項58】 波長切り替え検出手段は、主信号光及び2つのモニタ光にそれぞれ含まれる特定周波数成分強度に基づいて零分散波長が含まれる波長範囲を検出し、零分散波長が主信号光及び2つのモニタ光のいずれの波長よりも小さくなったことで、あるいは、大きくなったことでモニタ光の切替時期を検出することを特徴とする請求項57記載の光伝送システム。

【請求項59】 複数のデータ送信部、各送信部から出力する波長の異なる光を合波して光伝送路に送出する合波器、光伝送路から受信した光を波長毎に分波する分波器、各波長の光よりデータを識別する複数の受信部を備え、光伝送路の波長分散を補償する波長分散補償機能を有する波長多重光伝送システムにおいて、各送信部は、それぞれ異なる波長の光を発生する複数の光源、前記複数の光源から発生する光のうち所定の波長を有する光を主信号光として光伝送路に出力する手段、光源から発生する光を切り替えて光伝送路に出力することにより該光伝送路に出力する光の波長を変化する波長可変手段、

光伝送路の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長を検出するために、所定の光源から発生する光をモニタ光として選択し、前記主信号光に合波する手段、

合波された光を送信データにより変調して出力する光変調部、を備え、

前記各受信部は、

受信部に対応する送信部の所定光源から発生する光の波長と零分散波長との波長差により生じる分散を補償する分散補償器、

分散補償された主信号光とモニタ光に含まれる特定周波数成分強度の比が所定値になったことで主信号光の切替時期を検出する検出手段、を備えることを特徴とする波長多重光伝送システム。

【請求項60】 光伝送路の波長分散を補償する波長分散補償機能を有する波長多重光伝送システムにおいて、データにより光を変調して送信する複数の送信部、各送信部の光の波長を制御する出力波長制御部、各送信部から出力する波長の異なる光を合波して光伝送路に送出する合波器、

光伝送路から受信した光を波長毎に分波する分波器、各波長の光信号よりデータを識別する複数の受信部、各波長の光信号に含まれる特定周波数成分強度に基づいて対応する送信部の光の波長を制御する信号を、あるいは、所定の1つの波長の光信号に含まれる特定周波数成分強度に基づいて全送信部の光の波長を制御する信号を、前記出力波長制御部に送信する分散モニタ部、を備え、

前記各送信部は、

波長の異なる光を出力する波長可変光源、

該波長可変光源からの光を送信データで変調して合波器に入力する光変調部、を備え、

前記各受信部は、

受信部に対応する送信部の光の波長と零分散波長との波長差により生じる分散を補償する分散補償器、

該分散補償器から出力する光信号よりデータを識別するデータ受信部、を備え、少なくとも1つの受信部は更に、

分散補償器から出力する光信号に含まれる特定周波数成分強度を検出して前記分散モニタ部に入力する検出部、を備え、前記分散モニタ部は、受信部の前記検出部で検出した特定周波数成分強度に基づいて対応する送信部あるいは全送信部の波長を制御する信号を出力波長制御部に送信し、出力波長制御部は分散モニタ部から受信する波長制御信号に基づいて各送信部の波長可変光源の波長を個別に制御することを特徴とする波長多重光伝送システム。

【請求項61】 複数のデータ送信部、各送信部から出力する波長の異なる光を合波して光伝送路に送出する合波器、光伝送路から受信した光を波長毎に分波する分波器、各波長の光よりデータを識別する複数の受信部を備

え、光伝送路の波長分散を補償する波長分散補償機能を有する波長多重光伝送システムにおいて、

各送信部は、

それぞれ異なる波長の光を発生する複数の光源、

前記複数の光源から発生する光のうち所定の光を主信号光として光伝送路に出力する手段、

光源から発生する光を切り替えて光伝送路に出力することにより該光伝送路に出力する主信号光の波長を変化する波長可変手段、

光伝送路の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長を検出するために、2つの光源から発生する光をモニタ光として選択し、前記主信号光に合波する手段、

合波された光を送信データにより変調して出力する光変調部、を備え、

前記各受信部は、

受信部に対応する送信部の所定光源から発生する光の波長と零分散波長との波長差により生じる分散を補償する分散補償器、

分散補償された主信号光及び2つのモニタ光にそれぞれ含まれる特定周波数成分強度を比較することにより最適波長が含まれる波長範囲を検出し、最適波長を挟んだ2波長の強度比が所定値になったことで主信号光の切替時期を検出する検出手段、を備えることを特徴とする波長多重光伝送システム。

【請求項62】 送信部と光伝送路と受信部を備え、光伝送路の波長分散を補償する波長分散補償機能を有する波長多重光伝送システムにおいて、

異なる波長の光を発生する複数の光源、

前記複数の光源から発生する光のうち n 個の光を主信号光として選択する手段、

選択された各主信号光を n 個の各送信データにより変調して出力する光変調部、

各光変調部から出力する光を合波して光伝送路に送出する合波器、

光伝送路から受信した光を波長毎に分波する分波器、零分散波長と前記 n 個の光源から発生する光の各波長との波長差により生じる分散を補償する n 個の分散補償器、

各分散補償器から出力する光信号よりデータを識別する受信部、

隣接する2つの分散補償器から出力する光に含まれる特定周波数成分強度の比が設定値になったことで n 個の主信号光の切替時期を検出する検出手段、を備え、

前記主信号光を選択して出力する手段は、主信号光の切替に際して、 n 個の全主信号光が短波長側あるいは長波長側に1波長間隔分シフトするように主信号光を切り替えることを特徴とする波長多重光伝送システム。

【請求項63】 前記主信号光を選択して出力する手段は、1波長おきに n 個の光を主信号光として選択すると共に、主信号光の切替に際して、 n 個の全主信号光が短

波長側あるいは長波長側の隣の未使用波長へ一括してシフトすることにより主信号光を切り替えることを特徴とする請求項62記載の波長多重光伝送システム。

【請求項64】 送信部と光伝送路と受信部を備え、光伝送路の波長分散を補償する波長分散補償機能を有する波長多重光伝送システムにおいて、

異なる波長の光を発生する複数の光源、

前記複数の光源から発生する n ($n \geq 3$) 個の光を主信号光として選択する手段、

選択された各主信号光を n 個の各送信データにより変調して出力する光変調部、

各光変調部から出力する光を合波して光伝送路に送出する合波器、

光伝送路から受信した光を波長毎に分波する分波器、

n 個の光源から発生する光の各波長と零分散波長との各波長差により生じる分散を補償する n 個の分散補償器、各分散補償器から出力する光信号よりデータを識別する受信部、

隣接する3つの分散補償器から出力する光に含まれる特定周波数成分強度を比較することにより最適波長が含まれる波長範囲を検出し、最適波長を挟んだ2波長の強度比が設定値になったことで主信号光の切替時期を検出する検出手段、を備え、前記主信号光を選択して出力する手段は、主信号光の切替に際して、 n 個の全主信号光が短波長側あるいは長波長側に1波長間隔分シフトするように主信号光を切り替えることを特徴とする波長多重光伝送システム。

【請求項65】 前記主信号光を選択して出力する手段は、1波長おきに n 個の光を主信号光として選択すると共に、主信号光の切替に際して、 n 個の全主信号光が短波長側あるいは長波長側の隣の未使用波長へ一括してシフトすることにより主信号光を切り替えることを特徴とする請求項64記載の波長多重光伝送システム。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は光送信機及び光伝送システムに係わり、特に、大容量化・高速化・長距離化を実現するために波長分散を補償する機能を備えた光送信機及び光伝送システムに関する。現在10 Gb/s光伝送システムの実用化が開始されているが、近年の急激なネットワーク利用の増加によりさらなるネットワークの大容量化の要求が高まっている。伝送速度10 Gb/s以上では特に分散補償を高精度に行う必要があり、このため、光伝送路の分散値を正確に測定して補償することが不可欠である。本発明は光伝送路の分散値モニタ、分散補償を最適に行うための技術に関するものである。

【0002】

【従来の技術】信号エネルギーの中の種々の成分（異なる周波数成分、異なるモード成分）に対して、信号の伝搬遅延時間が一定でないと受信端において信号波形が歪

む。このような遅延ひずみを生じる原因となる現象は“分散”と呼ばれ、光ファイバの伝送容量を決定する。光伝送システムでは、今後の更なる大容量化・高速化・長距離化を実現するために高精度で分散を測定し、該分散を補償する技術が必要である。

【0003】40Gb/s光伝送システムにおいて、波長分散が伝送距離を制限する要因の一つになる。分散トレランス（分散耐力）はビットレートの二乗で狭くなり、40Gb/sでは30ps/nmと10Gb/sでの約800 ps/nmに比べ非常に狭い範囲となる。図72(a)は40 Gb/s OTDM(光時分割多重)1.3μm零分散SMF 50km伝送実験による分散補償量とパワーペナルティの関係を示すもの、(b)は測定系である。測定系において、TXは光送信機、RXは受信機、FBは50kmの1.3μm零分散SMF、CBは-920ps/nmの固定分散補償ファイバである。従来より、光伝送路として1.3μm零分散SMFが使用されていたが、高速伝送における分散が制約となっている。そこで、最近では零分散波長を1.3μmから1.55μmにシフトして分散の低減をはかった分散シフト光ファイバが開発されて敷設され、光送信機から出力する光の波長は1.55μmとなっている。こ

$$D_T = 0.03(\text{nm}/^\circ\text{C}) \times 150(^\circ\text{C}) \times 0.07(\text{ps}/\text{nm}^2/\text{km}) \times 50(\text{km}) \\ = 15.8(\text{ps}/\text{nm})$$

となり、分散補償トレランス30ps/nm内から外れてしまう恐れがある。

【0005】図73は波長分散特性図であり、横軸は光送信機から出力する光の波長(nm)、縦軸は波長分散量である。前述のように、1.3μm零分散SMF 50kmを介して40Gb/sのベースバンド信号を1.55μmの光信号で伝送すると920ps/nmの分散を生じる。そこで-920ps/nmの固定分散補償ファイバCBを用いて100%分散補償すると、1.552μmで波長分散が0になり、零分散波長は1.552μm(=1552nm)となる。光送信機から出力する光の波長が零分散波長からずれると図示する直線で示す量の波長分散が発生する。

【0006】

【発明が解決しようとする課題】波長分散補償法として、OTDM信号およびNRZ信号のベースバンドスペクトル中の40GHz成分強度を用いる方法が考えられる。この方法は、40GHz成分強度の2つのピーク間の極小点で分散量が0となり、アイ開口度が最大になる特性を利用する方法である。図74は40Gb/s NRZ信号での分散量に対する40GHz成分強度とアイ開口度のシミュレーション結果を示すもので、横軸は分散値(ps/nm)、縦軸が40GHz成分強度、アイ開口度であり、(a)は $\alpha > 0$ 、(b)は $\alpha < 0$ の場合である。尚、 α は送信波形の立ち上がり立ち下りの変動方向、量をあらわすチャーピングパラメータである。データパルスの立ち上がり、立ち下りにより光変調器の印加電圧が増大及び減少するときに波長変動(チャーピング)が発生し、このチャーピングの影響で、(1)受信側パルスの立ち上がりが遅れ、立ち下がりが速くなり

のため、1.55μmの光が従来敷設した1.3μm零分散SMFを介して伝送されることになる。

【0004】1.3μm零分散SMF 50kmを介して、40Gb/sのベースバンド信号を1.55μmの光信号で伝送すると920ps/nmの分散を生じる。そこで-920ps/nmの固定分散補償ファイバCBを用いて100%分散補償すれば受信感度劣化は0dBとなる。しかし、分散補償量が100%分散補償量(=-920ps/nm)より大きすぎたり、小さすぎると図72(a)に示すように受信感度劣化が上昇し、分散補償量が-905ps/nm、-935ps/nmで1dBになる。換言すれば、100%分散補償した状態において(分散補償量=-920ps/nm)、±15ps/nm以上の分散が更に発生すると受信感度劣化が1dB以上になる。このため、パワーペナルティ1dB以下を伝送可能条件としたときの分散補償トレランスはわずか30ps/nmとなり、厳密な分散補償を行わなければならない。また、この狭いトレランスの中で温度やファイバにかかる応力などにより経時的な変化に対応して、伝送路分散の変化量を測定し分散補償量を最適化しなければならない。温度による分散変動 D_T は、例えば伝送路SMF50km、温度変化-50°C~+100°Cを想定すると、

($\alpha < 0$)、あるいは、(2)受信側パルスの立ち上がりが早まり、立ち下がりが遅れる($\alpha > 0$)。前者の場合には、アイ口径は時間軸方向に圧縮されて小さくなり、後者の場合には時間軸方向に延ばされて小さくなる。

【0007】図74(a)、(b)より、 $\alpha = +0.7, -0.7$ のとき、分散値がそれぞれ-40ps/nm、+40ps/nm付近で40GHz成分強度はピークを示し、ピークの麓で最小値となり、このとき、分散値は0、アイ開口度は最大になる。このように、分散値が0(零分散波長=1552μm)、アイ開口度が最大するとき、40GHz成分強度が0になる理由は、NRZ信号であると40Gb/sは20GHzに相当し、40GHz成分が含まれないためである。従って、40GHz成分強度の麓を検出することにより零分散波長を検出できる。図75は40Gb/s NRZ信号での波長対40GHz成分強度の温度特性(実験値)を示すもので、温度-35°C~+65°C、DSF 100kmにおける伝送実験結果で、(a)は $\alpha > 0$ 、(b)は $\alpha < 0$ の場合である。図74のシミュレーション結果と同様に α 正負において、それぞれ40GHz成分強度のピークの麓である最小値点が零分散波長(分散量=0)を示している。また、温度変動に追従して零分散波長が変化していることが分かる。すなわち、温度変動により光伝送路の分散量が変動すると、それに応じて光伝送路の零分散波長が増減する。

【0008】そこで、零分散波長を検出し、送信側で光伝送路に出力する光の波長を該零分散波長に等しくすればよい。しかし、零分散波長を検出しなければならないため、光の波長を連続的に広範囲に可変する必要がある。波長を広範囲に連続的に変化する波長可変レーザ

は、構造が複雑で、しかも、コスト的にも実現が困難あるいは不可能であるのが現状である。このため、現在研究が進められている半導体アイレーザ（1つのウェハ上に多数のLDチップ形成したもの）や、既存の光システムで用いられている単体の半導体レーザLDを複数個利用するほうが実用化に近いと考えられる。しかし、1つのウェハ上に波長の異なる多数のLDチップが形成された半導体アレイレーザや、複数の波長の異なる単体の半導体レーザを用いる場合、波長切替え時に光の遮断を生じ、結果的に伝送信号の遮断が生じる。又、波長切り替え前後の信号遅延時間に大きな差が生じ信号劣化が発生する。

【0009】以上より、本発明の目的は、波長可変レーザを用いなくても、光伝送路の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長の光を光伝送路に出力して分散補償することである。本発明の目的は、半導体アレイレーザや複数の単体の半導体レーザのように、波長の異なる複数の光源を用いても波長切替時に信号遮断や信号劣化が生じないようにすることである。本発明の目的は合波器、アレイ導波路格子（Arrayed-waveguide grating: AWG）、スターカプラ、波長可変フィルタあるいは光減衰器などを用いて簡単に波長切り替えができるようにすることである。本発明の目的は、波長の異なる複数の光源を用いる場合であっても、零分散波長を検出して精度良く分散補償ができるようにすることである。

【0010】本発明の目的は、波長の異なる複数の光源を用いる場合において、波長切替前後の信号遅延を零あるいは小さくして信号劣化を防止することである。本発明の目的は、主信号光にモニタ光を合波して、零分散波長が長波長方向あるいは短波長方向に変動したか、及び零分散波長が隣接光源波長の中間波長になったかを検出し、零分散波長が隣接光源波長の中間波長になったとき光源を切り替えることにより光伝送路の波長分散を補償することである。本発明の目的は主信号光にモニタ光を合波して送信する場合、主信号光とモニタ光間の偏波を直交することにより、零分散波長の変動方向などの検出精度を向上することである。本発明の目的は、NRZ変調方式、RZ変調方式、OTDM変調方式など任意の光変調方式に対応できるようにすることである。本発明の目的は、それぞれ波長が異なる主信号光と2つのモニタ光を合波し、零分散波長が変動して零分散波長を挟んだ2つの波長の強度比が所定値になったことで主信号光を切り替えることにより光伝送路の波長分散を補償することである。本発明の目的は、波長多重光伝送システムに波長分散補償を適用できるようにすることである。

【0011】

【課題を解決するための手段】（a）構成

図1～図3は本発明の光伝送システムの第1～第3の原理図である。各図において、10は光送信機、20は光受信機、30は光伝送路、40は光伝送路の波長分散に

対して伝送特性が最適になる波長（零分散波長）を検出するための最適波長検出部（分散モニタ部）、50は検出結果を光送信機10に送る光伝送路である。最適波長検出部40は、光伝送路に出力される光の波長が零分散波長であれば、受信したベースバンドスペクトル信号中の特定周波数成分強度が最小なることを利用する。光送信機10において、 $11_1 \sim 11_n$ は波長（ $\lambda_1 \sim \lambda_n$ ）の異なる複数の光源であり、半導体アレイレーザや複数の単体の半導体レーザで形成されるもの、12は複数の光源から発生する光のうち所定の光を光伝送路30に出力する光出力部、13aは出力波長制御部であり、光伝送路に出力する光の波長を変化すると共に、最適波長検出部40の検出結果に基づいて最適波長の光を光伝送路に出力するものである。又、図2の原理図において、13bは光伝送路に出力する光の波長を所定周期で微小変動させる波長微小振動部、図3の原理図において、13cは主信号光にモニタ光を合波するモニタ光合波制御部である。

【0012】（b）第1の原理（図1）

それぞれ異なる波長 $\lambda_1 \sim \lambda_n$ の光を発生する複数の光源 $11_1 \sim 11_n$ を設ける。光伝送路の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長（零分散波長）が既知であれば、出力波長制御部13aの制御により光出力部12は複数の光源から出力する光のうち、最適波長に最も近い波長を有する光を光伝送路30に出力する。最適波長が既知でなければ、光伝送システムの運用開始前、光出力部12は出力波長制御部13aの制御により複数の光源から発生する光のうち所定の光を光伝送路30に順次出力して光の波長を変化し、最適波長検出部40は受信ベースバンドスペクトル信号中の特定周波数成分強度が最小になったタイミングを光送信機10の出力波長制御部13aに通知する。出力波長制御部13aは特定周波数成分強度が最小になったタイミングに光伝送路に出力していた光の波長より零分散波長を認識する。システム運用に際して、光出力部12は出力波長制御部13aの制御により、複数の光源 $11_1 \sim 11_n$ から出力する光のうち最適波長検出部40により検出された最適波長（零分散波長）に最も近い波長を有する光を光伝送路30に出力する。第1の原理によれば、波長可変レーザを用いなくても、光伝送路の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長の光を光伝送路に出力して分散補償することができる。

【0013】（c）第2の原理（図2）

それぞれ異なる波長 $\lambda_1 \sim \lambda_n$ の光を発生する複数の光源 $11_1 \sim 11_n$ を設ける。光伝送システムの運用開始前、光出力部12は出力波長制御部13aの制御により複数の光源から発生する光のうち所定の光を光伝送路30に順次出力して光の波長を変化し、最適波長検出部40は受信ベースバンドスペクトル信号中の特定周波数成分強度が最小になったタイミングを検出して光送信機10の

出力波長制御部13aに通知する。出力波長制御部13aは特定周波数成分強度が最小になったタイミングに光伝送路に出力していた光の波長より零分散波長を認識する。システム運用に際して、光出力部12は出力波長制御部13aの制御により、複数の光源11₁～11_nから出力する光のうち、最適波長検出部40により検出された最適波長に最も近い波長を有する光を光伝送路30に出力する。又、波長微小変動部13bは光伝送路に出力する光の波長を所定の低速周期で微小変動する。

【0014】システム運用中にも最適波長検出部40は最適波長の検出制御を行い、特定周波数成分強度が最小になったタイミングを光送信機10の出力波長制御部13aに通知する。出力波長制御部13aは特定周波数成分強度が最小になったタイミングに光伝送路に出力していた光の波長より零分散波長を認識する。経年変化等により零分散波長が変化し、該零分散波長が現光源波長と隣接光源波長の中間波長になれば、出力波長制御部13aの制御により光出力部12は光伝送路30へ出力する光を現光源の光から隣接光源の光に切り替える。以後、同様の波長分散補償制御を行う。

【0015】以上により、波長の異なる複数の光源を用いる場合であっても、システム運用前、及びシステム運用中、零分散波長を検出して精度良く分散補償ができる。又、零分散波長が現光源波長と隣接光源波長の中間波長にシフトした時、光伝送路に出力する光を現光源から該隣接光源に切り替えるようにしたから、波長切替前後の信号遅延を零あるいは小さくでき信号劣化を防止することができる。又、光源切替時、現光源への電流注入量を漸減し、隣接する光源への電流注入量を漸増することにより光の瞬断なく波長を切り替えることができ、信号遮断を防止できる。同様に、光源切替時、現光源と隣接光源からの光を同時に光伝送路に出力し、ついで、現光源からの光伝送路への光出力を停止することにより光の瞬断なく波長を切り替えることができ、信号遮断を防止できる。

【0016】(d)第3の原理(図3)

それぞれ異なる波長 $\lambda_1 \sim \lambda_n$ の光を発生する複数の光源11₁～11_nを設ける。システムの運用開始前、光出力部12は出力波長制御部13aの制御により複数の光源から発生する光のうち所定の光を光伝送路30に順次出力して光の波長を変化し、最適波長検出部40は受信ベースバンドスペクトル信号中の特定周波数成分強度が最小になったタイミングを検出して光送信機10の出力波長制御部13aに通知する。出力波長制御部13aは特定周波数成分強度が最小になったタイミングに光伝送路に出力していた光の波長より零分散波長を認識する。光伝送システムの運用に際して、光出力部12は出力波長制御部13aの制御により、複数の光源11₁～11_nから出力する光のうち、最適波長検出部40により検出された最適波長に最も近い波長を有する光を主信号光とし

て光伝送路30に出力する。このとき、モニタ光合波制御部13cの制御で、光出力部12はモニタ光を主信号光に合波して光伝送路に出力する。モニタ光は例えば現光源に隣接する光源から出力する光である

【0017】システム運用中にも最適波長検出部40は最適波長の検出制御を行い、受信した主信号光のベースバンドスペクトル信号中の特定周波数成分強度とモニタ光のベースバンドスペクトル信号中の特定周波数成分強度とから、(1)零分散波長の変動方向及び(2)該零分散波長が主信号光の波長と隣接光源波長の中間にシフトしたことを検出し、検出結果を光送信機10の出力波長制御部13aに通知する。この結果、出力波長制御部13aの制御により光出力部12は光伝送路30へ出力する光を現光源の光から隣接光源の光に切り替える。以後、同様の波長分散補償制御を行う。以上により、主信号光にモニタ光を合波して、零分散波長が長波長方向あるいは短波長方向に変動したか、及び零分散波長が隣接光源波長の中間波長になったかを検出し、零分散波長が隣接光源波長の中間波長になったとき光源を切り替えることにより光伝送路の波長分散補償を精度良く行うことができる。

【0018】又、零分散波長が現光源波長と隣接光源波長の中間波長にシフトした時、光伝送路に出力する光を現光源から該隣接光源に切り替えるようにしたから、波長切替前後の信号遅延を零あるいは小さくでき信号劣化を防止することができる。又、光源切替時、現光源への電流注入量を漸減し、隣接する光源への電流注入量を漸増することにより光の瞬断なく波長を切り替えることができ、信号遮断を防止できる。同様に、光源切替時、現光源と隣接光源からの光を同時に光伝送路に出力し、ついで、現光源からの光伝送路への光出力を停止することにより光の瞬断なく波長を切り替えることができ、信号遮断を防止できる。又、信号光とモニター光の偏波を直交させ、直交偏波状態を保持してこれら光を光伝送路に送出することにより隣接した波長の信号間で発生するビートを防ぎ最適波長検出部における検出精度を向上することができる。又、モニタ光を2波にし、主信号光と2つのモニタ光にそれぞれ含まれる特定周波数成分強度を比較することにより最適波長が含まれる波長範囲を検出し、最適波長を挟んだ2波長の強度比が設定値になったことで主信号光の切替時期を検出して主信号を切り替える。このように2波のモニタ光を用いれば、各モニタ光の特定成分強度の増減を常にモニタする必要がなく、ある時間における3波の特定成分強度の絶対値を比較するだけで良い。

【0019】(e)第4の原理(各種光変調方式に対応可能にする)

(1)最適波長検出部は、受信光のベースバンドスペクトル信号に含まれる特定周波数成分強度が最小となる波長を最適波長として検出し、システム運用中、該検出され

た最適波長の光を光伝送路に出力する。

(2) あるいは、最適波長検出部は受信光のベースバンドスペクトル信号に含まれる特定周波数成分強度が最大となる波長を最適波長として検出し、送信部はシステム運用中、検出された最適波長の光を光伝送路に出力する。

(3) あるいは、最適波長検出部の前に分散付与部を設け、システム運用前、最適波長検出部は該分散付与部を介して入力する受信光のベースバンドスペクトル信号に含まれる特定周波数成分強度が最大となる波長 λ_{\max} を検出し、システム運用中、送信部は分散付与部を介して最適波長検出手段に入力する光の波長が λ_{\max} となるような波長の光を光伝送路に出力する。この場合光伝送路に出力する光の波長は、受信光のベースバンドスペクトル信号に含まれる特定周波数成分強度が最小となる波長となる。

(4) あるいは、最適波長検出部の前に分散付与部を設け、システム運用前、最適波長検出部は該分散付与部を介して入力する受信光のベースバンドスペクトル信号に含まれる特定周波数成分強度が最小となる波長 λ_{\min} を検出し、システム運用中、送信部は分散付与部を介して最適波長検出手段に入力する光の波長が λ_{\min} となるような波長の光を光伝送路に出力する。この場合光伝送路に出力する光の波長は、受信光のベースバンドスペクトル信号に含まれる特定周波数成分強度が最大となる波長となる。

【0020】特定周波数成分強度特性は、NRZ変調方式、OTDM変調方式、RZ変調方式などの光変調方式により異なる。このため、NRZ変調方式では、特定周波数成分強度特性のピークの麓の最小部分を検出することで、OTDM変調方式では2つのピーク間の谷部分を検出することで、RZ変調方式では最大値を検出することで、最適波長の検出が可能になる。そこで、光変調方式により上記(1)～(4)のいずれかを適用することにより、光伝送路に零分散波長またはそれに最近の波長の光を出力できる。

【0021】(f) 第5の原理(波長多重)

複数のデータ送信部、各送信部から出力する波長の異なる光を合波して光伝送路に送出する合波器、光伝送路から受信した光を波長毎に分波する分波器、分波器から出力する各波長の受信光よりデータを識別する複数の受信部を備えた波長多重光伝送システムに波長分散補償機能を持たせる。すなわち、各送信部は主信号光、モニタ光を合波して送信し、各受信部はそれぞれ零分散波長の変動に応じて主信号光の切り替えるタイミングを検出し、各送信部は該タイミングで主信号光を発生する光源に隣接する光源から発生する光を主信号光とする。

【0022】

【発明の実施の形態】(A) 本発明の概略

(a) 多数の光源の使用

本発明は、波長の異なる光を発生する多数の光源を使用

し、光伝送路の波長分散に対して伝送特性が最適になる所定光源からの波長の光を該光伝送路に出力して分散補償する光伝送システム及び光送信機である。

(b) 半導体アレイレーザまたは単体の半導体レーザの使用

光源には、複数の発振波長のレーザを集積した半導体アレイレーザ(佐々木ほか「MOVPE選択成長を用いた多波長MQW-DBRレーザアレイ」、1994年電子情報通信学会秋期大会SC-2-2)や既存の光通信システムで使用されている波長の異なる単体の半導体レーザを複数並べて用いる。

(c) 最適波長が既知の分散補償

最適波長(例えば、零分散波長)が既知で、波長変化が分散トレランスに比べて小さいシステムであれば、複数の光源から出力する光のうち、前記最適波長に最も近い波長を有する光を光伝送路に出力する。

【0023】(d) 最適波長が未知で、波長変化が小さい場合の分散補償

最適波長が未知で、波長変化が分散トレランスに比べて小さいシステムであれば、光伝送システムの運用前に、複数の光源から発生する波長の異なる光を順次光伝送路に出力して最適波長を検出し、システム運用時に、該検出された最適波長に最も近い波長を有する光源から発生する光を光伝送路に出力する。

(e) 最適波長が未知で、波長変化が大きい場合の分散補償

最適波長が未知で、波長変化が分散トレランスに比べて大きいシステムであれば、光伝送システムの運用前に、複数の光源から発生する波長の異なる光を順次光伝送路に出力して最適波長を検出し、システム運用時に、該検出された最適波長に最も近い波長を有する光源から発生する光を光伝送路に出力する。又、システム運用中において、光伝送路に出力した光の波長を低速周期で微小振動して経年変化による新たな最適波長(零分散波長)を検出できるようにし、光送信機はシステム運転中に検出した最適波長の光を光伝送路に出力するように光源を切り替える。

【0024】(f) 最適波長が未知で、波長変化が大きい場合の別の分散補償

最適波長が未知で、波長変化が分散トレランスに比べて大きいシステムであれば、光伝送システムの運用前に、複数の光源から発生する波長の異なる光を順次光伝送路に出力して最適波長を検出し、システム運用時に該検出された最適波長に最も近い波長を有する光源から発生する光を主信号光として光伝送路に出力する。又、システム運用中において、光伝送路に出力した主信号光にモニタ光を合波して光伝送路に出力して経年変化による最適波長(零分散波長)の変動方向、変動量を検出できるようにし、光送信機はシステム運転中に経年変化などで零分散波長が変動して現光源と隣接光源の中間波長に等しくなれば光源を現光源から隣接光源に切り替える。

【0025】(g) 光源切替法

図4に伝送距離50kmでの零分散波長 $\lambda_0=1552\text{nm}$ を基準としたときの群遅延特性を示す。群遅延特性は、ファイバの2次分散を

$$dD/d\lambda=0.07 \text{ (ps/nm}^2/\text{km)} \quad (1)$$

とすると、分散Dは

$$D=0.07(\lambda-\lambda_0) \text{ (ps/nm/km)} \quad (2)$$

となり、さらに(2)式を積分すると遅延 T_D は

$$T_D=0.07/2 \times (\lambda-\lambda_0)^2 + \alpha \\ =0.035(\lambda-\lambda_0)^2 \text{ (ps/km)} \quad (3)$$

から求まる。ただし、 $\alpha=0$ とする。

【0026】(3)式より、群遅延特性は零分散波長 λ_0 を中心とした2次曲線を示し、 $\lambda_0=\lambda_1$ の場合には2次曲線BC1になり、 $\lambda_0=\lambda_2$ の場合には2次曲線BC2になる。2次曲線の対称性のため、零分散波長 λ_0 が $\lambda_1(=1552\text{nm})$ から $\lambda_2(=1553.6\text{nm})$ 方向へ変動している場合(BC1→BC2)、 λ_0 が丁度 λ_1 と λ_2 の中心波長($\lambda_0=(\lambda_1+\lambda_2)/2$)となったとき、出力光の波長を λ_1 から λ_2 へ切替えれば、波長切替前後の信号遅延は等しく、かつ、小さくなり、波長切替前後で群遅延の不連続な変化が生じない。尚、 λ_1 、 λ_2 は隣接する2つの光源から発生する光の波長である。一般に、隣接光源波長を λ_{n-1} 、 λ_n 、波長間隔 $\Delta\lambda$ とすれば、光源を切替えるときの零分散波長 λ_0 は

$$\lambda_0=\lambda_{n-1}+\Delta\lambda/2 \quad (\lambda_0>\lambda_{n-1})$$

$$=\lambda_n-\Delta\lambda/2 \quad (\lambda_0<\lambda_n)$$

$$\Delta\lambda=|\lambda_{n-1}-\lambda_n|$$

である。以上の方式を用いず、例えば零分散波長 λ_0 が λ_1 から1.6nm離れた波長 λ_2 に変化した時に出力光の波長を λ_1 から λ_2 へ切替えれば、波長切替前後の信号遅延は図4より4.5psとなる。伝送速度40Gb/s(1ビット=25ps)では、無視のできない値でありこの遅延が信号劣化を引き起こす可能性がある。

【0027】(h) 光源切替時における信号遮断防止

光伝送路に出力する光信号の波長を λ_1 から λ_2 へ切替える場合、光源をスイッチ等で切替えるだけでは、信号に遮

$$\Delta\lambda \text{ (nm)} = D \text{ (ps/nm)} / 0.07 \text{ (ps/nm}^2/\text{km)} \cdot 50 \text{ (km)} \quad (4)$$

となり、(4)式より光源波長間隔を決定できる。

【0030】(B) 実施例

(a) 複数の光源を有する送信機の構成

(a-1) 光送信機の第1実施例

図8は複数の光源として半導体レーザを備えた光送信機の第1実施例構成図であり、10は光送信機、20は光受信機、30は光伝送路である。光送信機10において、11a₁～11a_nは波長($\lambda_1 \sim \lambda_n$)の異なる複数の光源であり、複数の単体の半導体レーザで形成されるもの、11b₁～11b_nは各半導体レーザを駆動する駆動部、12aは各光源から発生する光を出力するアレイ導波路格子(AWG: Arrayed Waveguide Grating)である。アレイ導波路格子(AWG)12aは合分波器としての

断が生じる。本発明では、光源の切替え動作を工夫することで信号の遮断を防ぐ。図5は信号の遮断なしに光源を切り替える方法の説明図であり、(a)は光増幅器の制御なしで光伝送路へ出力するトータルの光強度信号を一定にしつつ光源を切り替える第1の光源切替方法、(b)は光増幅器を用いて光伝送路へ出力する光強度信号を一定にしつつ光源を切り替える第2の光源切替方法である。

【0028】図6は第1の光源切替方法における各光源駆動部の注入電流制御説明図である。波長 λ_1 の光源が発光している状態(T0)において、波長 λ_2 の光源D2への注入電流を徐々に加えて発光させていく(T1)。このとき、常に波長 λ_1 、 λ_2 の両光源D1、D2の光強度の和が一定になるように波長 λ_1 の光源D1の光強度を弱める。以後、波長 λ_2 の光源D2の光強度を漸増すると共に、波長 λ_1 の光源D1の光強度を漸減することにより、 $\lambda_1 \rightarrow \lambda_2$ への波長切替を信号の遮断なく行える(T2)。又、第2の光源切替方法によれば、光増幅器使用時であっても光増幅器への入力光強度の急激な変化を避けることができ、光増幅器による光サージ発生を避けることができる。すなわち、図5(b)に示すように、波長 λ_1 の光源を発光している状態で、波長 λ_2 の光源も同時に発光させ、ついで、波長 λ_1 の光源を消光させる。かかる光源切替では、波長 λ_1 、 $\lambda_1+\lambda_2$ 、 λ_2 の強度比が1:2:1になる。そこで、光増幅器のゲインを制御して出力光強度が一定になるようにフィードバック制御する。

【0029】(h) 光源最大波長間隔

図7は1552nmを零分散波長としたときの、隣接光源の最大波長間隔($\Delta\lambda=\lambda_{n-1}-\lambda_n$)と分散補償量精度(=分散値D)の関係を示している。伝送速度が上昇するほどシステムに必要とされる分散補償量精度、すなわち隣接波長間で光源を切替えたときの分散値変化量を細かくする必要がある。伝送距離50kmで零分散波長 $\lambda_0=1552\text{nm}$ 、ファイバの2次分散0.07(ps/nm²/km)とすると、許容分散変動量D(ps/nm)に対する光源最大波長間隔 $\Delta\lambda$ (nm)は(2)式より

機能を備え、複数の導波路から入力された波長の異なる光を合波して波長多重光として出力すると共に、逆向きに波長多重光を入力すれば波長毎に分波して各導波路に出力する。従って、アレイ導波路格子(AWG)12aを合波器として使用して所定の光源のみ発光すれば該光源からの光を出力できる。

【0031】12bはアレイ導波路格子(AWG)から出力する光を40Gb/sの信号でオン/オフ変調する外部変調器で、例えば、LiNbO₃ マッハツェンダ型変調器あるいはEA(Electro Absorption)型変調器(電界吸収型変調器)である。13は出力波長制御部であり、所定の駆動部11b₁～11b_nをして対応する半導体レーザを発光させ、これにより光伝送路に出力する光の波長を変更するもの

である。従って、出力波長制御部13は光伝送路30の零分散波長を取得すれば、該零分散波長に最も近い波長を有する光を発生する光源を駆動し、該光を光伝送路に出力して分散補償する。

【0032】(a-2) 光送信機の第2実施例

図9は複数の光源として半導体レーザを備えた光送信機の第2実施例構成図であり、図8の第1実施例と同一部分には同一符号を付している。異なる点は、合波器としてアレイ導波路格子(AWG)12aの代わりにスターカプラ12cを使用する点であり、他の部分の構成及び動作は第1実施例とまったく同じである。

【0033】(a-3) 光送信機の第3実施例

図10(a)、(b)は複数の光源として半導体レーザを備えた光送信機の第3実施例構成図であり、図8、図9と同一部分には同一符号を付している。図10(a)において、図8の光送信機と異なる点は、半導体レーザとして変調器内蔵型レーザ(MI-DFB-LD)11c₁~11c_nを使用し、外部変調器12bを削除した点である。変調器内蔵型レーザは同一基板上に半導体レーザ11a₁~11a_nと変調部11c₁'~11c_n'を形成したものである。又、図10(b)において、図9の光送信機と異なる点は、半導体レーザとして変調器内蔵型レーザ(MI-DFB-LD)11c₁~11c_nを使用し、外部変調器12bを削除した点である。

【0034】(a-4) 光送信機の第4実施例

図11は複数の光源として半導体アレイレーザを備えた光送信機の第4実施例構成図であり、図8の第1実施例と同一部分には同一符号を付している。異なる点は、複数の光源として半導体レーザの代わりに半導体アレイレーザ11dを使用する点である。この第4実施例によれば、必要な波長間隔を持ったレーザを1枚のウェハ上で実現でき、低コスト、小型化が可能になる。

(a-5) 光送信機の第5実施例

図12は複数の光源として半導体アレイレーザを備えた光送信機の第5実施例構成図であり、図9の第2実施例と同一部分には同一符号を付している。異なる点は、複数の光源として半導体レーザの代わりに半導体アレイレーザ11dを使用する点である。

【0035】(b) 最適波長が既知の場合の分散補償
最適波長(例えば、零分散波長)が既知で、波長変化が分散トレランスに比べて小さいシステムであれば、複数の光源から出力する光のうち、最適波長(零分散波長)を有する光を光伝送路に出力することにより、光伝送路の分散による波形劣化を補償することができる。図13はかかる最適波長が既知の場合における分散補償を行う光伝送システムの第1実施例の構成図であり、10は光送信機、20は光受信機、30は光伝送路である。光送信機10において、11₁~11_nは波長(λ_1 ~ λ_n)の異なる複数の光源であり、複数の半導体レーザあるいは半導体アレイレーザを用いて構成することができる。

12は合波器であり、アレイ導波路格子(AWG)あるいはスターカプラなどで構成することができる。12bは合波器12から出力する光を40Gb/sの信号でオン/オフ変調する外部変調器で、例えば、LiNbO₃ マッハツェンダ型変調器あるいはE A型変調器(電界吸収型変調器)である。13は出力波長制御部であり、所定の光源11₁~11_nを発光させ、これにより光伝送路に出力する光の波長を変更するものである。

【0036】最適波長、例えば零分散波長が設定されると、出力波長制御部13は該零分散波長に最も近い波長を有する光を発生する光源のみを常時発光する。合波器12は該光源より出力する光を外部変調器12bに入力し、外部変調器12bは入力光を40Gb/sの信号でオン/オフ変調して光伝送路30に出力する。図14は第1実施例の変形例であり、第1実施例と同一部分には同一符号を付している。図13の第1実施例は無中継伝送の場合であるが、図14に示すように多中継伝送する場合にも適用できる。図中、30a~30nは光伝送路、31a、31b、...は中継器である。尚、以後の実施例では無中継伝送の場合を示すが多中継伝送にも応用できる。

【0037】(c) 最適波長が未知で、波長変化が小さい場合の分散補償

最適波長が未知で波長変化が分散トレランスに比べて小さければ、①光伝送システムの運用前に複数の光源から発生する波長の異なる光を順次光伝送路に出力して最適波長を検出し、②システム運用時に該検出した最適波長に最も近い波長を有する光を発生する光源からの光を光伝送路に出力する。図15は最適波長が未知で、波長変化が分散トレランスに比べて小さい場合において分散補償を行う光伝送システムの構成図であり、10は光送信機、20は光受信機、30は下り光伝送路、40は光伝送路の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長、例えば零分散波長を検出するための分散モニタ部(最適波長検出部)、50は上り光伝送路、51は分散モニタ結果を送信する分散モニタ信号送信部、52は分散モニタ信号受信部で、モニタ結果を抽出して光送信機10に入力する。

【0038】光送信機10において、11₁~11_nは波長(λ_1 ~ λ_n)の異なる複数の光源であり、複数の半導体レーザあるいは半導体アレイレーザを用いて構成することができる。12は合波器であり、アレイ導波路格子(AWG)あるいはスターカプラなどで構成することができる。12bは合波器12から出力する光を40Gb/sの信号でオン/オフ変調する外部変調器、13は出力波長制御部であり、所定の光源11₁~11_nを発光させ、これにより光伝送路に出力する光の波長を変更すると共に、分散モニタ部40での検出結果に基づいて最適波長の光を光伝送路に出力させるものである。分散モニタ部40は、光伝送路30に出力される光の波長が光伝送路の零

分散波長と等しければ、受信したベースバンドスペクトル信号中の特定周波数成分強度が最小なることを利用して最適波長を検出する。例えば、40Gb/sの信号を送送する場合、前記特定周波数は40GHzである(図76、図77参照)。分散モニタ部40において、40aは光伝送路30から分岐した光を電気信号に変換するホトダイオード等の受光器、40bは特定周波数を中心周波数とするバンドパスフィルタ(BPF)、40cは特定周波数成分、例えば40GHz成分が最小になったタイミングを検出する強度検出部である。

【0039】最適波長が既知でなく、波長変化が分散トレランスに比べて小さいシステムであれば、システム運用開始前、出力波長制御部13は所定の時間間隔で各光源11₁~11_nを順次発光する。これにより、合波器12は複数の光源から発生する異なる波長 $\lambda_1 \sim \lambda_n$ の光を順次外部変調器12bに入力し、外部変調器12bは異なる波長 $\lambda_1 \sim \lambda_n$ の入力光を40Gb/sの信号でオン/オフ変調して光伝送路30に出力する。分散モニタ部40は受信ベースバンドスペクトル信号中の40GHz成分強度が最小になったタイミングを検出し、分散モニタ信号送信部51を入力する。分散モニタ信号送信部51は該タイミングデータを光伝送路50を介して送信側に送り、分散モニタ信号受信部52はモニタ結果(タイミングデータ)を抽出して出力波長制御部13に入力する。出力波長制御部13は特定周波数成分強度が最小になったタイミングに光伝送路30に出力していた光の波長より零分散波長を識別する。

【0040】そして、システム運用中、出力波長制御部13は該零分散波長の光を発生する光源のみを発光し、零分散波長光を光伝送路30に出力する。この結果、光伝送路30の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長光を出力して分散補償することができる。図16は受信部の構成図であり、分散モニタ信号送信部51(図15)の機能を備えている。図中、55aは分波器、55bは電気インタフェース(信号処理部)、55cは合波器、55dは送信機である。電気インタフェース55bは光電/電光変換、信号受信処理、送信信号作成処理、信号送信処理などを行う。従って、電気インタフェース部55bは、分散モニタ部40の処理部40dから入力したモニタ結果(タイミングデータ)を取り込み、送信信号のデータ部あるいはオーバーヘッド部に挿入し、合波器55c、送信機55dを介して上り光伝送路50に送出する。以上より、電気インタフェース部55b及び合波器55c、送信機55dの有する機能により図15の分散モニタ信号送信部51が構成される。

【0041】図17は図15の実施例の変形例であり、光伝送路30が高分散シングルモードファイバ(SMF)の場合において、固定分散補償器56を用いてほぼ100%分散補償した光伝送システムに図15の分散補償法を適用した例である。このような100%分散補償した光伝送シ

ステムにも光源切り替えによる波長掃引、零分散波長検出を行って分散補償することができる。尚、多中継伝送の場合、固定分散補償器は、送信側、受信側、中継器側に配置することが考えられる。

【0042】図18は最適波長が未知で、波長変化が分散トレランスに比べて小さい場合において分散補償を行う光伝送システムの別の実施例構成図であり、図15の実施例と同一部分には同一符号を付している。図15の実施例と異なる点は、(1)各光源11₁~11_nの後段に光を減衰する光減衰器(ATT)14₁~14_nを設け、各光減衰器出力を合波器12に入力している点、(2)各光源11₁~11_nを常時発光している点、(3)出力波長制御部13の制御で各光減衰器14₁~14_nをオン/オフ制御し、所定の光源からの光のみ合波器12に入力している点、である。

【0043】システム運用開始前、全光源11₁~11_nを発光すると共に、全光減衰器14₁~14_nをオンして各光源からの光を減衰する。この状態で、出力波長制御部13は所定の時間間隔で光源11₁~11_nに対応する光減衰器14₁~14_nを順番に1個ずつオフし(1個のみオフ、他はオン)、合波器12に順次各光源11₁~11_nからの光が入力するように制御する。これにより、合波器12は各光源から発生する異なる波長 $\lambda_1 \sim \lambda_n$ の光を順番に外部変調器12bに入力し、外部変調器12bは異なる波長 $\lambda_1 \sim \lambda_n$ の入力光を40Gb/sの信号でオン/オフ変調して光伝送路30に出力する。分散モニタ部40は受信ベースバンドスペクトル信号中の40GHz成分強度が最小になったタイミングを検出し、分散モニタ信号送信部51は該タイミングデータを送信機側へ送り、分散モニタ信号受信部52はモニタ結果(タイミングデータ)を抽出して出力波長制御部13に入力する。出力波長制御部13は特定周波数成分強度が最小になったタイミングにおいて光伝送路30に出力していた光の波長より零分散波長を識別する。

【0044】そして、システム運用中、出力波長制御部13は該零分散波長を有する光を発生する光源に対応する光減衰器のみオフし、零分散波長光のみを光伝送路30に出力する。この結果、光伝送路30の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長光を出力して分散補償することができる。図19は最適波長が未知で、波長変化が分散トレランスに比べて小さい場合において分散補償を行う光伝送システムの更に別の実施例構成図であり、図15の実施例と同一部分には同一符号を付している。図15の実施例と異なる点は、(1)合波器12と外部変調器12bの間に波長可変フィルタ15を設け、指示された波長の光のみ通過出力する点、(2)各光源11₁~11_nを常時発光している点、(3)合波器12が各光源11₁~11_nから発生する異なる波長 $\lambda_1 \sim \lambda_n$ の光を合波して波長可変フィルタ15に入力している点、(4)出力波長制御部13の制御で波長可変フィルタ15から出

力する光の波長制御している点、である。

【0045】図20は波長可変フィルタの構成図であり、15aはLiNbO₃(ニオブ酸リチウム)などの電気光学効果を有する基板に形成されたSAW導波路、15bはすだれ電極(Interdigital Transducer; IDT)、15cはTi拡散によってSAW導波路を挟むように形成されSAWクラッド、15d、15eは弾性表面波(Surface Acoustic Wave: SAW)を吸収する吸収体、15f、15gはTi拡散により形成された光導波路、15h、15iは偏光無依存動作させるための交差型の偏光ビームスプリッタ(Polarization Beam Splitter: PBS)で、2本の直線導波路を挟んだ構成になっている。15jはすだれ電極15bに170~180MHzの高周波信号を印加する高周波信号付与部であり、高周波発生器15j-1に、すだれ電極IDTの入力キャパシタンスを打ち消すためのインダクタンス15j-2を直列に接続した構成を有している。すだれ電極15に高周波信号を印加すると弾性表面波SAWが発生し、この弾性表面波はその周波数に応じた特定の波長の偏波を90°回転させる効果がある。このため、入力側と出力側に偏光ビームスプリッタ15h、15iを設けて偏光分離することにより可変波長フィルタを実現できる。例えば、入力光としてTEモードの波長多重光を波長可変光フィルタ15に入力すると、すだれ電極に印加する高周波信号の周波数に応じた波長の偏波のみが90°回転してTMモードの偏波になり、該TMモードの偏波が光導波路15gから出力する。

【0046】図21は波長可変フィルタのチューニング特性を示すもので、横軸は高周波信号の周波数、縦軸は選択波長を示している。高周波信号の周波数に反比例して選択波長が短くなっている。従って、図19の出力波長制御部13の制御で高周波信号付与部15jから出力する高周波信号の周波数を所定周期で掃引することにより、波長可変フィルタ15は入力光に含まれる各波長の光を順次選択的に出力できる。システム運用開始前、全光源11₁~11_nを発光し、合波器12において各光源11₁~11_nから発生する異なる波長 λ_1 ~ λ_n の光を合波して波長可変フィルタ15に入力する。この状態で、出力波長制御部13は波長可変フィルタ15を制御して所定の時間間隔で波長 λ_1 ~ λ_n の光を順番に外部変調器12bに入力する。外部変調器12bは入力した異なる波長 λ_1 ~ λ_n の光を40Gb/sの信号でオン/オフ変調して光伝送路30に出力する。

【0047】分散モニタ部40は受信ベースバンドスペクトル信号中の40GHz成分強度が最小になったタイミングを検出し、分散モニタ信号送信部51は該タイミングデータを送信機側に送り、分散モニタ信号受信部52はモニタ結果(タイミングデータ)を抽出して出力波長制御部13に入力する。出力波長制御部13は特定周波数成分強度が最小になったタイミングにおいて光伝送路30に出力していた光の波長より零分散波長を識別する。

そして、システム運用中、出力波長制御部13は該零分散波長の光を光伝送路30に出力するように波長可変フィルタ15を制御する。この結果、光伝送路30の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長光を出力して分散補償することができる。

【0048】(d)最適波長が未知で、波長変化が大きい場合の分散補償

最適波長が未知で、波長変化が分散トレランスに比べて大きいシステムでは、

①光伝送システムの運用前に複数の光源から発生する波長の異なる光を順次光伝送路に出力して最適波長を検出し、②システム運用時に該検出した最適波長に最も近い波長を有する光源からの光を光伝送路に出力する。又、③システム運用中、光伝送路に出力した光の波長を低速周期で微小振動し、経年変化による零分散波長が変化しても該零分散波長を検出できるようにし、④経年変化により零分散波長が現光源と隣接光源の中間波長に変化したとき、光送信機は光源を現光源から隣接光源に切り替えて光伝送路に出力する光の波長を変更する。現光源と隣接光源の中間波長で波長を切り替えることにより、波長切替前後の信号遅延を等しく、かつ、小さくでき、波長切替前後で群遅延の不連続な変化が生じず、信号劣化をなくすることができる。

【0049】図22は最適波長が未知で、波長変化が分散トレランスに比べて大きい場合に分散補償する光伝送システムの構成図であり、図15の実施例と同一部分には同一符号を付している。異なる点は、(1)システム運用中において、光伝送路に出力する光の波長を変動する点、(2)各光源(例えば半導体レーザ)11₁~11_nにATC回路(自動温度制御回路)16₁~16_nを設け、光源の温度を設定温度に制御する点、(3)温度可変制御部17を設け、光伝送路に出力している光を発生する光源の温度を可変して出力光の波長を可変している点、である。図22の実施例では、光伝送路30の零分散波長が $\Delta\lambda/2$ ($\Delta\lambda$ は光源波長間隔)変化したとき、光源を現光源から隣接光源に切り替える。そこで、零分散波長が $\Delta\lambda/2$ 変化したことを検出できるようにするために、光伝送路30に出力する光の波長を $\pm\Delta\lambda/2$ 以上変化させる必要がある。半導体レーザ11₁~11_nは周囲温度により出力光の波長を変化するから、出力光の波長が $-\lambda' \sim +\lambda'$ (但し $\lambda' > \Delta\lambda/2$)の範囲で変化するように半導体レーザの温度を制御する。

【0050】図23はATC回路の例であり、11は光源としての半導体レーザ(LD)、16aは電流の方向によりLDチップを加熱、冷却するペルチェ素子、16bはLDチップの温度を検出する負性抵抗特性を有するサーミスタ、16cはこれら半導体レーザ、ペルチェ素子、サーミスタを収容するパッケージである。16d、16eは抵抗、16f、16gはPNP、NPNのトランジスタ、16hはコンパレータである。コンパレータの反転

端子にはサーミスタと抵抗で分圧した電圧 (LD 温度に応じた電圧) V_t が入力し、正転端子には基準電圧 V_{ref} が入力され、出力端子は各トランジスタのベースに接続されている。PNP トランジスタ 16 f のエミッタは V_+ に接続され、NPN トランジスタ 16 g のエミッタは V_- に接続され、各トランジスタのコレクタはペルチェ素子 16 a に接続されている。

【0051】半導体レーザ 11 の温度が低いと、サーミスタ 16 b の抵抗が増加して電圧 V_t が減小し、 $V_t < V_{ref}$ となり、コンパレータ 16 h の出力が正になる。この結果、トランジスタ 16 f がオフ、トランジスタ 16 g がオンしてペルチェ素子を発熱する方向に電流が流れてパッケージ内を加熱し、LD 温度が上昇する。LD の温度が上昇すると、サーミスタの抵抗が減小して電圧 V_t が増加し、 $V_t > V_{ref}$ となり、コンパレータ 16 g の出力が負になる。この結果、トランジスタ 16 f がオン、トランジスタ 16 g がオフしてペルチェ素子を冷却する方向に電流が流れて LD 温度を下降する。この結果、LD 温度は設定温度となるように制御できる。

【0052】最適波長が未知で波長変化が分散トレランスに比べて大きければ、まず、システム運用開始前、出力波長制御部 13 は所定の時間間隔で各光源 11₁ ~ 11_n を順次発光する。これにより、合波器 12 は複数の各光源から発生する異なる波長 λ_1 ~ λ_n の光を順次外部変調器 12 b に入力し、外部変調器 12 b は異なる波長 λ_1 ~ λ_n の入力光を 40Gb/s の信号で変調して光伝送路 30 に出力する。分散モニタ部 40 は受信ベースバンドスペクトル信号中の 40GHz 成分強度が最小になったタイミングを検出し、分散モニタ信号送信部 51 に入力する。波長・モニタ成分強度の関係は図 24 に示すように 2 次曲線で近似でき、出力光の波長が零分散波長のとき強度が最小なる。そこで、モニタ成分強度が最小になるタイミングを検出して分散モニタ信号送信部 51 に入力する。分散モニタ信号送信部 51 は該タイミングデータを光伝送路 50 を介して送信側に送り、分散モニタ信号受信部 52 はモニタ結果 (タイミングデータ) を抽出して出力波長制御部 13 に入力する。出力波長制御部 13 は特定周波数成分強度が最小になったタイミングに光伝送路 30 に出力していた光の波長 λ_1 より零分散波長が λ_1 であると識別する (図 24 点線参照)。

【0053】そして、システム運用中、出力波長制御部 13 は該零分散波長 λ_1 の光を発生する光源 (現光源という) のみを発光し、該光を光伝送路 30 に出力する。この結果、光伝送路 30 の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長光を出力して分散補償することができる。又、システム運用中、温度可変制御部 17 は現光源の ATC 回路を制御して光源の温度を可変する。すなわち、温度可変制御部 17 は温度一定制御に要する時間 T の周期で順次設定温度を変更して出力光の波長を変化する。分散モニタ部 40 は受信ベースバンドスペクトル信

号中の 40GHz 成分強度が最小になったタイミングを検出し、該タイミングを出力波長制御部 13 に送る。出力波長制御部 13 は受信したタイミングにおける設定温度に基づいて、設定温度・波長変換テーブル (図示せず) を参照して光伝送路 30 に出力していた光の波長 λ' を求め、該波長より零分散波長を識別する。ついで、出力波長制御部 13 は光伝送路の経年変化等の原因で零分散波長が光源波長間隔 $\Delta\lambda$ ($=\lambda_2 - \lambda_1$) の半分 ($=\Delta\lambda/2 = (\lambda_2 - \lambda_1)/2$) だけ変化したかチェックし、 $\Delta\lambda/2$ 以下であれば、光源の切り替えを行わない。しかし、図 24 の実線で示すように $\Delta\lambda/2$ 以上変化すれば、光源を現光源から隣接光源に切り替える。

【0054】以上では、1 つの光源のみを発光する光送信機に適用した場合について説明したが、図 25 に示すように光源 11₁ ~ 11_n と合波器 12 の間に光減衰器 14₁ ~ 14_n を備え、全光源を常時発光し、所定の光減衰器のみをオフすることにより該減衰器に応じた光源からの光を光伝送路 30 に出力する送信機にも適用できる。又、図 26 に示すように波長可変フィルタ 15 を備え、全光源を常時発光し、波長可変フィルタで所望の波長を有する光を光伝送路に出力する送信機にも適用できる。

【0055】(e) 最適波長が未知で、波長変化が大きい場合の別の分散補償

最適波長が未知で波長変化が分散トレランスに比べて大きければ、①光伝送システムの運用前に複数の光源から発生する波長の異なる光を順次光伝送路に出力して最適波長を検出し、②システム運用時に該検出した最適波長に最も近い波長を有する光源からの光を主信号光として光伝送路に出力する。又、③システム運用中、主信号光にモニタ光を合波して光伝送路に出力して経年変化による最適波長 (零分散波長) の変動方向、変動量を検出できるようにし、④経年変化により零分散波長が現光源と隣接光源の間波長に変化したとき、光送信機は光源を現光源から隣接光源に切り替えて光伝送路に出力する光の波長を変更する。現光源と隣接光源の間波長で波長を切り替えることにより、波長切替前後の信号遅延を等しく、かつ、小さくでき、波長切替前後で群遅延の不連続な変化が生じず、信号劣化をなくすることができる。

【0056】図 27 は主信号光とモニタ光を用いて零分散波長の変動方向及び零分散波長が現光源と隣接光源の間波長に変化したことを検出する原理説明図である。波長とモニタ成分強度 (40GHz 成分) の関係は図 27 に示すように 2 次曲線で近似でき、出力光の波長が零分散波長のとき強度が最小になる。光伝送路の零分散波長 λ が λ_0 、所定の光源より出力する主信号光の波長が λ_1 、隣接光源から出力するモニタ光の波長が λ_2 のとき、波長・モニタ成分強度の関係は図 27 (a) の一点鎖線で示す特性になっており、波長 λ_1 におけるモニタ成分強度は $P(\lambda_1)$ 、波長 λ_2 におけるモニタ成分強度は $P(\lambda_2)$ である。かかる状態から零分散波長が長波長側に変動すると

($\lambda=\lambda'$)、波長・モニタ成分強度の関係は図27

(a)の実線で示す特性に変化する。このため、波長 λ_1 におけるモニタ成分強度は $P(\lambda_1)^2$ 、波長 λ_2 におけるモニタ成分強度は $P(\lambda_2)^2$ となる。すなわち、零分散波長 λ_0 が長波長側に変動すると主信号光波長(λ_1)のモニタ成分強度が増加し、モニタ光波長(λ_2)のモニタ成分強度が減少する。

【0057】一方、図27(b)の一点鎖線で示す状態から($\lambda=\lambda_0$)、零分散波長が短波長側に変動すると($\lambda=\lambda_1$)、波長・モニタ成分強度特性は図27(b)の実線で示す特性になる。このため、波長 λ_1 におけるモニタ成分強度は減少し、波長 λ_2 におけるモニタ成分強度は増加する。すなわち、零分散波長 λ_0 が短波長側に変動すると、主信号光波長(λ_1)のモニタ成分強度が減少し、モニタ光波長(λ_2)のモニタ成分強度が増加する。以上より、主信号光波長(λ_1)とモニタ光波長(λ_2)におけるモニタ成分強度(40GHz成分)の増減方向より零分散波長の変動方向を検出できる。又、2次曲線の対称性より、零分散波長が主信号光波長 λ_1 とモニタ光波長 λ_2 の中間波長(現光源と隣接光源の中間波長)に変化したとき、波長 λ_1 におけるモニタ成分強度と波長 λ_2 におけるモニタ成分強度が等しくなる。換言すれば波長 λ_1, λ_2 におけるモニタ成分強度が等しくなったことを検出することにより、零分散波長が現光源と隣接光源の中間波長に変化したことを検出できる。尚、零分散波長 λ_0 が変動して主信号光の波長 λ_1 以下あるいは以上になれば、その前後で主信号光波長(λ_1)とモニタ光波長(λ_2)におけるモニタ成分強度が共に増加または共に減少する。

【0058】図28は最適波長が未知で、波長変化が分散トレランスに比べて大きい場合に分散補償する光伝送システムの構成図であり、10は光送信機、20は光受信機、30は下り光伝送路、41は主信号光を通過する波長可変の第1の光フィルタ、42はモニタ光を通過する波長可変の第2の光フィルタ、43~44は波長分散モニタ部であり、これまでの実施例における波長分散モニタ部40と同一の構成を有している。

【0059】波長分散モニタ部43は波長 λ_1 の主信号光に含まれる40GHz成分をモニタして該モニタ成分強度を出力し、波長分散モニタ部44は波長 λ_2 ($>\lambda_1$)のモニタ光に含まれる40GHz成分をモニタして該モニタ成分強度を出力する。45は分散補償制御部であり、波長分散モニタ部43~44から入力するモニタ成分強度に基づいて、①零分散波長の変動方向、②零分散波長が現光源と隣接光源の中間波長に変化したこと、③零分散波長が主信号光の波長以下あるいは以上になったことを識別し、識別結果に基づいて各光フィルタ41~42の波長設定制御、光源切替制御を行うものである。50は上り光伝送路、51は分散補償制御部から入力する信号(モニタ結果、光源切替指示等)を送信する分散モニタ信号送信部、52は分散モニタ信号受信部で、モニタ結

果、光源切替指示を抽出して光送信機10に入力する。

【0060】光送信機10において、 $11_1 \sim 11_n$ は波長($\lambda_1 \sim \lambda_n$)の異なる複数の光源であり、複数の半導体レーザあるいは半導体アレイレーザを用いて構成することができる。12は合波器であり、アレイ導波路格子(AWG)あるいはスターカプラなどで構成することができる。12bは合波器12から出力する光を40Gb/sの信号でオン/オフ変調する外部変調器、13は出力波長制御部であり、システム運用前に光源 $11_1 \sim 11_n$ を順次発光させて光伝送路に出力する光の波長を変更すると共に、システム運用時に最適波長の光を主信号光として光伝送路に出力し、かつ、モニタ光を主信号光に合波して光伝送路に出力するものである。最適波長が未知で波長変化が分散トレランスに比べて大きければ、システム運用開始前に全波長の光が波長分散モニタ43に入力するようにする。かかる状態において、出力波長制御部13は所定の時間間隔で各光源 $11_1 \sim 11_n$ を順次発光する。これにより、合波器12は複数の各光源から発生する異なる波長 $\lambda_1 \sim \lambda_n$ の光を順次外部変調器12bに入力し、外部変調器12bは異なる波長 $\lambda_1 \sim \lambda_n$ の入力光を40Gb/sの信号で変調して光伝送路30に出力する。

【0061】波長分散モニタ部43は受信ベースバンドスペクトル信号中の40GHz成分強度が最小になったタイミングを検出し、分散補償制御部45に入力する。分散補償制御部45は分散モニタ信号送信部51を介して該タイミングを送信側に送る。分散モニタ信号受信部52はモニタ結果(タイミングデータ)を抽出して出力波長制御部13に入力する。出力波長制御部13はモニタ成分強度が最小になったタイミングで光伝送路30に出力していた光の波長 λ_0 が零分散波長であると認識する。そして、零分散波長 λ_0 を挟む光源波長 λ_1, λ_2 のうち零分散波長 λ_0 に近い波長 λ_1 を主信号光波長とし、 λ_2 をモニタ光波長とする。以後、図29のフローに従ってシステム運用時の波長分散補償制御を行う。尚、最適波長が既知で波長変化が分散トレランスに比べて大きければ、直ちに、零分散波長 λ_0 を挟む光源波長 λ_1, λ_2 のうち零分散波長 λ_0 に近い波長 λ_1 を主信号光波長とし、 λ_2 をモニタ光波長として、図29のフローに従ってシステム運用時の波長分散補償制御を行う。

【0062】システム運用に際して、分散補償制御部45は第1の光フィルタ41の中心波長として主信号光の波長 λ_1 を設定し、第2の光フィルタ42の中心波長としてモニタ光の波長 λ_2 を設定する(ステップ101)。又、出力波長制御部13は主信号光の光源を発光し、該光を光伝送路30に出力する。この結果、光伝送路30の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長光を出力して分散補償することができる。又、システム運用中、出力波長制御部13は適宜モニタ光源を発光し、波長 λ_2 のモニタ光を主信号光に合波する(ステップ102)。

【0063】分散補償制御部45は波長分散モニタ部43~44から入力する主信号光波長(λ_1)とモニタ光波長(λ_2)におけるモニタ成分強度(40GHz成分)に基づいて零分散波長 λ_0 が現光源波長と隣接光源波長の中間波長に変化したかチェックする(ステップ103)。零分散波長が中間波長まで変化してなければ、ステップ102の制御を行う。しかし、零分散波長が中間波長まで変化すれば、分散補償制御部45は零分散波長 λ_0 の変動方向を識別する(ステップ104, 105)。零分散波長 λ_0 が長波長側へ変動していれば、第1の光フィルタ41の中心波長をシフトしてフィルタ幅内に波長 λ_1 、 λ_2 が入るように制御する(ステップ106)。ついで、分散補償制御部45は光送信機10の出力波長制御部13に主信号光の光源を長波長側に隣接する光源に切り替えるよう指示する。この指示により、出力波長制御部13は波長 λ_1 の光源に加えて波長 λ_2 の光源も発光し、しかる後、波長 λ_1 の光源を消光する(ステップ107)。以上により、光が途切れることなく主信号光の波長を長波長側に切替えることができる。

【0064】零分散波長が短波長側に変動して $\lambda_0 < \lambda_1$ となれば分散補償制御部45は第2光フィルタ42に中心波長として λ_0 を設定する。又、このとき、分散補償制御部45は光送信機の出力波長制御部13に波長 λ_2 の光源に代わって波長 λ_0 のモニタ光の光源を発光するよう指示する。以後、 $\lambda_0 < \lambda_1$ の範囲で分散補償制御が行われる。そして、零分散波長が短波長側へ変動して λ_0 と λ_1 の中間波長まで変化すれば、分散補償制御部45は第1の光フィルタ41の中心波長をシフトしてフィルタ幅内に波長 λ_0 、 λ_1 が入るように制御する(ステップ108)。ついで、分散補償制御部45は光送信機の出力波長制御部13に主信号光の光源を短波長側に隣接する光源に切り替えるよう指示する。この指示により、出力波長制御部13は波長 λ_1 の光源に加えて波長 λ_0 の光源も発光し、しかる後、波長 λ_1 の光源を消光する(ステップ109)。以上により、光が途切れることなく主信号光の波長を短波長側に切替えることができる。

【0065】図30は長波長側に主信号光の波長を切り替える際の波長切替制御説明図であり、Wは第1の光フィルタ41の波長フィルタ幅である。零分散波長が長波長側へ変動して現光源波長と隣接光源波長の中間波長まで変化すると、第1光フィルタ41の中心波長を長波長側にシフトし、フィルタ幅W内に波長 λ_1 、 λ_2 が入るように制御する(①→②→③)。ついで、波長 λ_1 の光源に加えて波長 λ_2 の光源も発光し、ついで、波長 λ_1 の光源を消光する(③→④)。以上により、光が途切れることなく主信号光の波長を長波長側に切替えることができる。図31は短波長側に主信号光の波長を切り替える際の波長切替制御説明図であり、Wは第1の光フィルタ41の波長フィルタ幅である。零分散波長が短波長側

へ変動して現光源波長と隣接光源波長の中間波長まで変化すると、第1光フィルタ41の中心波長を短波長側にシフトし、フィルタ幅W内に波長 λ_0 、 λ_1 が入るように制御する(①→②→③)。ついで、波長 λ_1 の光源に加えて波長 λ_0 の光源も発光し、ついで、波長 λ_1 の光源を消光する(③→④)。以上により、光が途切れることなく主信号光の波長を短波長側に切替えることができる。

【0066】図32は第1光フィルタ41のフィルタ幅範囲の説明図である。フィルタ幅Wは光源の波長間隔を $\Delta\lambda$ 、スペクトル幅を τ とし、四光波混合(four-wave mixing)を考慮すると、次式を満たす範囲となる。

$$\Delta\lambda + \tau < W < 3\Delta\lambda - \tau \quad (5)$$

但し、 $\Delta\lambda > \tau$

この範囲を図示すれば、図32の直線で囲まれた範囲(斜線部)となる。但し、スペクトル幅 $\tau=1\text{nm}$ (信号光40Gb/s $\times 3=120\text{G}\sim 1\text{nm}$)時のフィルタ幅範囲である。

【0067】図33はモニタ光と主信号光の波長関係説明図である。図28の実施例では主信号光とモニタ光を3つの隣接光源から発生する光として説明した(図33(a)参照)。しかし、主信号光とモニタ光の波長は隣接する必要はなく、図33(b)に示すように主信号光の光源から離れた光源の光をモニタ光として用いることもできる。又、四光波混合が発生しないように、モニタ光の波長を主信号光の波長から充分はなれた波長を用いることもできる。しかし、この場合には、図27で説明した原理で零分散波長の変動方向などを検出できない。このため、別の方法により波長分散量を算出する。尚、四光波混合とは、入力光とは異なる周波数の光が発生する現象である。

【0068】図34は主信号光の波長から充分離れた波長の光を用いて波長分散量を測定して分散補償制御する光伝送システムの構成図で、図35は波長分散量算出原理説明図である。図中、10は光送信機、20は光受信機、30は下り光伝送路、31は合波器、80は光伝送路の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長(零分散波長)を検出する分散モニタ部、50は上り光伝送路、51は分散モニタ結果を送信する分散モニタ信号送信部、52は分散モニタ信号受信部で、モニタ結果を抽出して光送信機10に入力する。

【0069】光送信機10において、11₁~11_nは波長($\lambda_1\sim\lambda_n$)の異なる複数の光源、12は合波器、12bは外部変調器、13は出力波長制御部であり、所定の光源11₁~11_nを発光させ、これにより光伝送路に出力する光の波長を変更すると共に、分散モニタ部80での検出結果に基づいて最適波長の光を光伝送路に出力させるものである。分散モニタ部80において、81は波長 λ の光を発生する半導体レーザ、82はパルス幅dのパルスを発生するパルス発生器、83はマッハツェンダ型変調器、84はパルス幅dの期間マッハツェンダ

型変調器の両側電極間に $2V\pi$ の駆動電圧を入力する駆動部、85は波長 $\lambda \pm \Delta\lambda$ の光を検出する光検出器、86は波長分散量算出部であり、波長分散量より零分散波長を求めることができる。

【0070】マッハツェンダ型変調器83は通常駆動電圧 $V\pi$ でデータ変調を行うが、2倍の駆動電圧 $2V\pi$ で変調を行うことにより駆動波形の立ち上がり(図35(a)の①)、立ち下がり(図35(a)の③)部分それぞれで短パルスを発生できる。また、マッハツェンダ型変調器83では、チャージング(波長変動) $\Delta\lambda$ が駆動電圧 $V\pi$ の微分値に比例する。このため、駆動波形の立ち上がり(図35(a)の①)と立ち下がり(図35(a)の③)とでチャージング $\Delta\lambda$ の符号が逆になり、発生した2つの短パルスはそれぞれ $\lambda + \Delta\lambda$ と $\lambda - \Delta\lambda$ の異なる波長を持つ。図35(b)に示す波形を有する

$$\Delta d(\text{ps}) = \text{伝送路の波長分散 } D(\text{ps/nm/km}) \cdot \text{伝送距離 } L(\text{km}) \cdot \Delta\lambda c(\text{nm}) \quad (6)$$

($\Delta\lambda c$:パルスピーク部分の $\Delta\lambda$)

で表せる。拡がり Δd が求まれば上式より、伝送路の波長分散 D を算出でき、波長分散 D から零分散波長が求まる。モニター信号送信部51はこの零分散波長を送信機に送り、送信機の出力波長制御部13は零分散波長が隣接光源波長の中間波長に等しくなったとき主信号光の光源を切り替える。

【0072】図34の実施例では受信機側に波長分散量算出部86を設けたが、図36に示すように波長分散量算出部86を送信側に設け、受信側より波長の異なる2つの短パルスを送信側に向けて送出し、送信側で波長分散 D 、零分散波長を算出するように構成することもできる。図28の実施例は必要な光源のみを発光する光送信機を使用した場合であるが、全ての光源を常時発光しておき光減衰器で所望の波長を有する光を光伝送路に出力する送信機を使用することもできる。図37はかかる光減衰器を用いた構成図であり、光源11₁~11_nと合波器12の間に設けられた光減衰器14₁~14_nをオフすることにより、オフした光減衰器に応じた光源からの光を光伝送路30に出力できる。従って、主信号光を発生する光源の光減衰器を常時オフすると共に、適宜、モニタ光を発生する光源の光減衰器をオフし、これら光源からの光を合波して光伝送路に出力することにより、図28と同様に出力光の波長を切り替えて分散補償制御をすることができる。

【0073】又、全光源を常時発光しておき、波長可変フィルタで所望の波長を有する光を光伝送路に出力する送信機を使用することもできる。図38はかかる波長可変フィルタを用いた構成図であり、合波器12の後段に設けた2つの波長可変フィルタ15'、15''を介してそれぞれ主信号光及びモニタ光を通過することにより、図28と同様に出力光の波長を切り替えて分散補償制御をすることができる。

【0074】主信号光やモニタ光のように隣接した波長

駆動信号 $V\pi$ でマッハツェンダ型変調器83を駆動すると発生した立ち上がり側のパルスの波長を $\lambda + \Delta\lambda$

(λ :光源の中心波長)、立ち下がり側のパルスの波長を $\lambda - \Delta\lambda$ に設定できる。また、図35(c)に示す波形を有する駆動信号 $V\pi$ でマッハツェンダ型変調器84を駆動すると、立ち下がり側のパルスの波長を $\lambda - \Delta\lambda$ に、立ち上がり側のパルスの波長を $\lambda + \Delta\lambda$ に設定できる。

【0071】以上のように1組の半導体レーザ81とマッハツェンダ型変調器83から生成された2つの短パルスはそれぞれ異なる波長を持つために、群遅延差により伝送後のパルス間隔に広がり Δd が生じる($d \rightarrow d + \Delta d$)。従って、この広がり Δd を検出することにより光伝送路の分散値を把握することが可能になる。拡がり Δd は次式

の光信号間ではビートが発生し、その影響で受信側において正しく波長分散モニタを実行できない場合がある。そこで、伝送する2つの光信号(主信号光、モニタ光)間の偏波を直交させるとビートの発生を防止でき、波長分散モニタの精度を向上することができる。図39は主信号光とモニタ光間の偏波を直交させて分散補償する実施例の構成図であり、図28の実施例と同一部分には同一符号を付しており、異なる点は光送信機10の構成である。光送信機10において、11₁~11_nは波長($\lambda_1 \sim \lambda_n$)の異なる複数の光源(半導体レーザ、半導体アレイレーザ)、12は合波器、12bは外部変調器、13は出力波長制御部であり、①システム運転前に所定の光源11₁~11_nを発光させ、これにより光伝送路に出力する光の波長を変更する制御、②システム運用時に分散モニタ結果に基づいて主信号光及びモニタ光を光伝送路に出力する制御、③システム運用時に主信号光とモニタ光間の偏波を直交させる制御を行う。18₁~18_nは偏波制御器で、出力波長制御部13からの指示に従って対応する光源から出力する光の偏波方向を制御するもの、19a~19bは偏波状態を保持する偏波保持ファイバである。

【0075】出力波長制御部13は主信号光とモニタ光の光源を発光すると共に、これら光源に対応する偏波制御器に主信号光とモニタ光間の偏波が直交するよう指示する。これにより、偏波制御器は主信号光とモニタ光間の偏波が直交するように調整し、これら光を偏波保持ファイバ19a→合波器12→偏波保持ファイバ19b→外部変調器12bを介して光伝送路へ送出する。偏波が直交しているため、ビートが生じず波長分散モニタの精度を向上でき、伝送路が数10kmの短距離伝送システムで有効である。

【0076】(f)モニタ光を使用して波長分散補償する実施例

図27は、波長に対する特定周波数成分強度特性を2次

曲線に近似した場合であり、2次曲線の対称性より、零分散波長が主信号光波長 λ_1 とモニタ光波長 λ_2 の中間波長に変化したことを、波長 λ_1 における特定周波数成分強度と波長 λ_2 における特定周波数成分強度が等しくなったことで検出する。しかし、特定周波数成分強度特性が2次曲線に近似できない場合がある。たとえば、光変調方式がNRZ変調方式では、40GHz成分強度特性が零分散波長に対して左右対称でない。このため、主信号光波長を λ_{s1} 、モニタ光波長を λ_{s2} とすれば、零分散波長が2つの波長中心に移動しても図40(c)に示すように、波長 λ_{s1} 、 λ_{s2} におけるモニタ成分強度 $I(\lambda_{s1})$ 、 $I(\lambda_{s2})$ は等しくならず、ある比を持つ。例えば、NRZ DSF100km伝送後、光源波長間隔が3.2nm ($=\lambda_{s2}-\lambda_{s1}$) のときモニタ成分強度比 $I(\lambda_{s1}) : I(\lambda_{s2})$ は α パラメータ $=0.7$ の場合、1:1.6となる。ただし、 α パラメータ $=+0.7$ であれば、 $I(\lambda_{s1}) : I(\lambda_{s2})=1.6:1$ となる。このように、特定周波数成分強度特性が2次曲線に近似できない場合、強度比 $I(\lambda_{s1}) : I(\lambda_{s2})$ を制御ソフトで検出して設定し、または制御端末から設定する。そして、以後、波長 λ_{s1} 、 λ_{s2} におけるモニタ値の経時変動を検知し、強度比 $I(\lambda_{s1}) : I(\lambda_{s2})$ が前記設定強度比と等しくなったことを検出する。等しくなれば、零分散波長は $(\lambda_{s2}+\lambda_{s1})/2$ であり、等しくなった時点でモニタ光を主信号光に、主信号光をモニタ光に切替える。

【0077】図40(a)は相対遅延時間特性、(b)はパワーペナルティ特性であり、光源波長間隔 $\lambda_{s2}-\lambda_{s1}$ は、 $\lambda_{s1}\sim\lambda_{s2}$ の範囲でパワーペナルティが1dB以下となるように決定する必要がある。図41は本実施例における光伝送システムの構成図であり、図28と同一部分には同一符号を付している。異なる点は、(1) 光源11₁～11_nと合波器12の間に光減衰器14₁～14_nを設け、所定の光減衰器をオフすることにより、オフした光減衰器に応じた光源からの光を合波器12及び外部変調器12bを介して光伝送路30に出力できるようにした点、(2) 波長分散モニター43、44の構成を明示した点、(3) 光受信機20で必要とするビットレートに同期した40GHz信号を発生する40GHz信号発生部46を付加した点である。

【0078】光減衰器14₁～14_nを設けたことにより、主信号光を発生する光源の光減衰器を常時オフすると共に、適宜、モニタ光を発生する光源の光減衰器をオフし、これら光源からの光を合波して光伝送路30に出力できる。すなわち、所定の光減衰器をオフすることにより主信号光、モニタ光の波長を切り替えて分散補償制御をすることができる。波長分散モニター部43、44は、光伝送路30から分岐した光を電気信号に変換するホトダイオード等の受光器43a、44a、特定周波数(40GHz)を中心周波数とするバンドパスフィルタ(BPF)43b、44b、アンプ43c、44c、特定周波数成分(40GHz成分)のパワーを検出するパワー検出部43d、

44d有している。40GHz信号発生部46は、フィルタ41から出力する光の波長を分散して40GHz成分を含む光を出力する分散付与部46a、分散付与部から出力する光を電気信号に変換するホトダイオード等の受光器46b、40GHzを中心周波数とするバンドパスフィルタ(BPF)46cを有している。

【0079】図42はシステム運用開始前の波長分散補償処理(初期設定)のフローである。システム運用開始前、出力波長制御部13は光減衰器14₁～14_nを順番に開閉する。又、分散補償制御部45は該開閉と連動させながら光フィルタ41の波長を制御し、かつ、パワーメータ43dの測定値である40GHz成分強度を読み込む(ステップ201)。分散補償制御部45はこの測定値を用いて40GHz成分強度特性をプロットする(図43

(a)参照、ステップ202)。分散補償制御部45は40GHz成分強度特性より40GHz成分強度が最小になる零分散波長 λ を挟む2つの光源波長 λ_2 、 λ_3 を求める(ステップ203)。ただし、40GHz成分強度は波長 λ_2 の方が波長 λ_3 より小さいものとする。ついで、出力波長制御部13は分散補償制御部45からの指示に従って、波長 λ_2 、 λ_3 に対応する光減衰器14₂、14₃を開き、又、分散補償制御部45は第1の光フィルタ41の中心波長として波長 λ_2 を設定し、第2の光フィルタ42の中心波長として波長 λ_3 を設定する(ステップ204)。以上により、零分散波長を挟む波長 λ_2 、 λ_3 ($\lambda_2<\lambda_3$)のうち零分散波長に近い波長 λ_2 の光が主信号光に、波長 λ_3 の光がモニタ光になる。

【0080】図44は零分散波長が長波側へ移動する場合における波長分散補償処理のフローである。システム運用に先立って、分散補償制御部45は40GHz成分強度特性より、主信号光を切り替えるための40GHz成分強度比 $I(\lambda_2) : I(\lambda_3)$ を求める(ステップ211)。強度比は1:1.6であるとする。ついで、システム運用中、分散補償制御部45はパワーメータ43d、44dより波長 λ_2 、 λ_3 の40GHz成分強度 $I(\lambda_2)$ 、 $I(\lambda_3)$ を読み込み(ステップ212)、1サンプリング前の40GHz成分強度 $I(\lambda_2)$ 、 $I(\lambda_3)$ との増加、減小を調べ、零分散波長が移動していることを認識する(ステップ213)。移動している場合において、 $I(\lambda_2)$ が増加、 $I(\lambda_3)$ が減少していれば(図43(b)参照)、零分散波長 λ が λ_2 、 λ_3 の間にあり、長波長側へ変動していると判断する(ステップ214)。ついで、 $I(\lambda_2)$ を1.6倍して補正し($I(\lambda_2) \times 1.6 \rightarrow I(\lambda_2)$)、補正後の $I(\lambda_2)$ と $I(\lambda_3)$ の大小を比較する(ステップ215)。

【0081】 $I(\lambda_2) < I(\lambda_3)$ であれば、ステップ212以降の処理を繰り返す、 $I(\lambda_2) = I(\lambda_3)$ であれば(ステップ216)、主信号光の切り替えを行う。すなわち、波長 λ_3 のモニター光を主信号光に、波長 λ_2 の主信号光をモニター光に切り替える。切り替え手順は後述する。主信号光切り替え後、零分散波長 λ が更に長波長側へ移

動して、 $I(\lambda_2)$ が増加、 $I(\lambda_3)$ が増加すれば、零分散波長 λ が主信号光の波長 λ_3 より大きくなり、 $\lambda_3 < \lambda < \lambda_4$ となる(図43(c)参照、ステップ217)。 $\lambda_3 < \lambda < \lambda_4$ となれば、光源波長 λ_4 の光をモニタ光に切り替える(図43(d)参照、ステップ218)。以後、ステップ212以降の処理を繰り返す。モニター光の切替に際して、光減衰器14₄を開き、光減衰器14₃を閉じ、第2光フィルタ42の中心波長として波長 λ_4 を設定する。

【0082】図45は主信号光切替制御の処理フロー、図46は主信号光の切替制御説明図である。 $I(\lambda_2) = I(\lambda_3)$ となれば(図44のステップ216)、波長 λ_3 のモニター光を主信号光に、波長 λ_2 の主信号光をモニター光に切り替える。まず、光減衰器14₃を閉じる(ステップ221、図44の状態a)。ついで、第1光フィルタ41の中心波長を長波長側にシフトし、フィルタ幅W内に波長 λ_2, λ_3 が入るように制御する(ステップ222、状態b、c)。状態cにおいて、光減衰器14₃を徐々に開き、光減衰器14₂を徐々に閉じる(ステップ223~225、状態d~f)。そして、光減衰器14₂が完全に閉じれば(状態g)、第1光フィルタ41の中心波長を λ_3 にシフトし(ステップ226、状態h)、これにより、主信号光の切り替えが完了する(ステップ227)。最後に、光減衰器14₂を開き、かつ、第2光フィルタ42の中心波長として λ_2 を設定する(ステップ228、状態i)。以上により光のパワーを一定に維持しながら主信号光の切り替えができる。状態cにおいて、信号の瞬断が生じないように光減衰器14₃から徐々に開き、ついで、光減衰器14₂を徐々に閉じる。光減衰器14₃をはじめに開く順番が大事であり、さきに光減衰器14₂を閉じると光の瞬断が生じるおそれがある。

【0083】図47は波長 λ_2 のモニター光を主信号光に、波長 λ_1 の主信号光をモニター光に切り替える場合の実験結果説明図であり、(a)は波長 λ_1, λ_2 の光受信パワー $P(\lambda_1), P(\lambda_2)$ 及びトータルのパワー P_{total} の特性、並びに受信感度特性を示すもの、(b)は切替開始A、切替途中B、切替終了Cにおけるアイパターン、(c)は、切替開始A、切替途中B、切替終了Cにおける光強度-波長特性図である。図47(a)より1dBベナルティ以下に押えて主信号光の切り替えができることが理解され、図47(b)よりアイパターンが劣化することなく主信号光の切り替えができることが理解される。

【0084】図48は零分散波長が短波長側へ移動する場合における波長分散補償処理のフロー、図49はその説明図である。システム運用開始前、図42の初期設定処理により、零分散波長を挟む波長 λ_2, λ_3 ($\lambda_2 < \lambda_3$)のうち零分散波長に近い波長 λ_3 の光を主信号光に、波長 λ_2 の光をモニタ光に設定する。システム運用に先立

って、分散補償制御部45は40GHz成分強度特性(図49(a)参照)より、主信号光を切り替えるための40GHz成分強度比 $I(\lambda_2) : I(\lambda_3)$ を求める(ステップ251)。強度比は1:1.6であるとする。ついで、システム運用中、分散補償制御部45はパワーメータ43d、44dより波長 λ_2, λ_3 の40GHz成分強度 $I(\lambda_2), I(\lambda_3)$ を読み込み(ステップ252)、1サンプリング前の40GHz成分強度 $I(\lambda_2), I(\lambda_3)$ との増加、減小を調べ、零分散波長が移動していることを認識する(ステップ253)。

【0085】移動している場合において、 $I(\lambda_2)$ が減少、 $I(\lambda_3)$ が増加していれば(図49(b)参照)、零分散波長 λ が λ_2, λ_3 の間にあり、短波長側へ変動していると判断する(ステップ254)。ついで、 $I(\lambda_2)$ を1.6倍して補正し($I(\lambda_2) \times 1.6 \rightarrow I(\lambda_2)$)、補正後の $I(\lambda_2)$ と $I(\lambda_3)$ の大小を比較する(ステップ255)。 $I(\lambda_2) > I(\lambda_3)$ であれば、ステップ252以降の処理を繰り返し、 $I(\lambda_2) = I(\lambda_3)$ であれば(ステップ256)、主信号光の切り替えを行う。すなわち、波長 λ_2 のモニター光を主信号光に、波長 λ_3 の主信号光をモニター光に切り替える。切り替え手順は後述する。主信号光切り替え後、零分散波長 λ が更に短波長側へ移動して、 $I(\lambda_2)$ が増加、 $I(\lambda_3)$ が増加すれば、零分散波長 λ が主信号光の波長 λ_2 より小さくなり、 $\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$ となる(図49(c)参照、ステップ257)。 $\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$ となれば、光源波長 λ_1 の光をモニタ光に切り替える(図49(d)参照、ステップ258)。以後、ステップ252以降の処理を繰り返す。モニター光の切替に際して、光減衰器14₁を開き、光減衰器14₃を閉じ、第2光フィルタ42の中心波長として波長 λ_1 を設定する。

【0086】図50は零分散波長が短波長側に変動している場合における主信号光切替制御の処理フロー、図51は主信号光の切替制御説明図である。 $I(\lambda_2) = I(\lambda_3)$ となれば(図48のステップ256)、波長 λ_2 のモニター光を主信号光に、波長 λ_3 の主信号光をモニター光に切り替える。まず、光減衰器14₂を閉じる(ステップ271、図51の状態a)。ついで、第1光フィルタ41の中心波長を短波長側にシフトし、フィルタ幅W内に波長 λ_2, λ_3 が入るように制御する(ステップ272、状態b、c)。状態cにおいて、光減衰器14₂を徐々に開き、光減衰器14₃を徐々に閉じる(ステップ273~275、状態d~f)。そして、光減衰器14₃が完全に閉じれば(状態g)、第1光フィルタ41の中心波長を λ_2 にシフトし(ステップ276、状態h)、これにより、主信号光の切り替えが完了する(ステップ227)。最後に、光減衰器14₃を開き、かつ、第2光フィルタ42の中心波長として λ_3 を設定する(ステップ228)。以上により光のパワーを一定に維持しながら主信号光の切り替えができる。状態cにおいて、信号の瞬断が生じないように光減衰器14₂から徐々に開き、ついで、光減衰器14₃を徐々に閉じる。

で、光減衰器14₃を徐々に閉じる。

【0087】図52は40Gb/sのデータで変調したときの各変調方式における40GHz成分強度特性であり、(a)はOTDM変調方式の特性図、(b)はRZ変調方式の特性図である。OTDM変調方式の場合、零分散波長は2つの山の中心で、特性が極小値を示す波長である。零分散波長近傍の特性は零分散波長で頂点を示す2次曲線で近似できる。2次曲線の対称性により零分散波長が主信号の光波長 λ_1 とモニタの光波長 λ_2 の中間に変化したことは、波長 λ_1 における40GHz成分強度と波長 λ_2 における40GHz成分強度が等しくなったことで検出できる。RZ変調方式の場合、零分散波長は特性が最大値を示す波長である。零分散波長近傍の特性は零分散波長で頂点を示す2次曲線で近似できる。2次曲線の対称性により零分散波長が主信号光波長 λ_1 とモニタ光波長 λ_2 の中間に変化したことは、波長 λ_1 における40GHz成分強度と波長 λ_2 における40GHz成分強度が等しくなったことで検出できる。

【0088】(g) 特定周波数成分強度が最大値を示す波長を検出して主信号光を制御する第1実施例
以上では、特定周波数成分強度が最小値を示す零分散波長を検出し、零分散波長を挟む2つの光源波長を主信号光、モニタ光として波長分散制御する場合である。ところで、図53より明らかなように、特定周波数成分強度(40GHz成分強度)が最大となるように光伝送路に送出する光の波長を決めてもパワーペナルティを1dB以下にできる。そこで、40GHz成分強度が最大になる波長 λ_m を挟む2つの光源波長 λ_2, λ_3 ($\lambda_2 < \lambda_3$) を求め、40GHz成分強度が大きい波長光を主信号光、他をモニタ光とする。強度最大となる波長近傍の特性は2次曲線で近似できる。2次曲線の対称性により強度最大となる波長が、主信号光波長 λ_2 とモニタ光波長 λ_3 の中央に変化したことは、波長 λ_2 の光に含まれる40GHz成分強度と波長 λ_3 の光に含まれる40GHz成分強度が等しくなったことで検出できる。

【0089】零分散波長の変動方向、すなわち、強度最大となる波長の変動方向は、光源波長 λ_2, λ_3 における強度 $I(\lambda_2), I(\lambda_3)$ の増減により求めることができる。すなわち、①強度最大波長が長波長側に変動すると、図54(a)に示すように主信号光波長 λ_2 のモニタ成分強度 $I(\lambda_2)$ が減少し、モニタ光波長 λ_3 のモニタ成分強度 $I(\lambda_3)$ が増加する。②又、強度最大波長 λ_m が更に長波長側に変動して波長 λ_3 より大きくなると、図54(b)に示すように $I(\lambda_2), I(\lambda_3)$ は共に減少する。③一方、強度最大波長が短波長側に変動すると、図54(d)に示すようにモニタ光波長 λ_2 のモニタ成分強度 $I(\lambda_2)$ が増加し、主信号光波長 λ_3 のモニタ成分強度 $I(\lambda_3)$ が減少する。又、強度最大波長 λ_m が更に短波長側に変動して波長 λ_2 より小さくなると、図54(e)に示すように $I(\lambda_2), I(\lambda_3)$ は共に減少する。

【0090】・強度最大波長が長波長側に変動する場合の制御

図41の光伝送システムにおいて、システム運用開始前に、モニタ成分強度が最大になる波長 λ_m を挟む2つの光源波長 λ_2, λ_3 ($\lambda_2 < \lambda_3$) を求め、モニタ成分強度が大きい波長 λ_2 の光を主信号光、波長 λ_3 の光をモニタ光とする。そして、システム運用中、強度最大波長が長波長側に変動して $I(\lambda_2) = I(\lambda_3)$ となれば波長 λ_3 のモニタ光を主信号光に、波長 λ_2 の主信号光をモニタ光に切り替える。強度最大波長が更に長波長側に変動して、 $I(\lambda_2), I(\lambda_3)$ が共に減少すれば(図54(b))、波長 λ_2 に替えて波長 λ_4 の光をモニタ光にする(図54(c)参照)。

【0091】・強度最大波長が短波長側に変動する場合の制御

図41の光伝送システムにおいて、モニタ成分強度が最大になる波長 λ_m を挟む2つの光源波長 λ_2, λ_3 ($\lambda_2 < \lambda_3$) を求め、モニタ成分強度が大きい波長 λ_3 の光を主信号光、波長 λ_2 の光をモニタ光とする。そして、システム運用中、強度最大となる波長が短波長側に変動して $I(\lambda_2) = I(\lambda_3)$ となれば波長 λ_2 のモニタ光を主信号光に、波長 λ_3 の主信号光をモニタ光に切り替える。強度最大波長が更に短波長側に変動して、 $I(\lambda_2), I(\lambda_3)$ が共に減少すれば(図54(e))、波長 λ_3 に替えて波長 λ_1 の光をモニタ光にする(図54(f)参照)。

【0092】(h) 特定周波数成分強度が最大値を示す波長を検出して主信号光を制御する第2実施例

上記第1実施例では、特定周波数成分強度が最大値を示す波長を検出し、該強度最大波長を挟む2つの光源波長を主信号光、モニタ光として波長分散制御する場合である。ところで、図55に示すように特定周波数成分強度が最大値を示す波長 λ_m と最小値を示す零分散波長 λ_0 の波長幅を $\Delta\lambda$ とし、特定周波数成分強度特性を $\Delta\lambda$ だけ左へシフトすると点線で示すようになる。このシフトした特性では、強度最大波長を示す波長は零分散波長になる。また、零分散波長の近傍で特性は2次曲線になるため正確な波長分散補償制御ができる。そこで、第2実施例では特定周波数成分強度が最大値を示す波長を検出し、光伝送路に零分散波長の光を送出するように制御する。

【0093】図56は強度最大波長を検出して主信号光の切替を制御する光伝送システムの構成図であり、図41の光伝送システムと同一部分には同一符号を付している。異なる点は、強度最大波長 λ_m と零分散波長の波長差 $\Delta\lambda$ に応じた波長分散を受信光に付与する分散付与部47、48を、第1、第2の光フィルタ41、2の出力側に設けた点である。この分散付与部47、48により、主信号光の波長 λ_2 が設定される第1の光フィルタ41から出力する光の波長は $(\lambda_2 + \Delta\lambda)$ とされ、モ

ニタ光の波長 λ_3 が設定される第2の光フィルタ42から出力する光の波長は $(\lambda_3 + \Delta\lambda)$ とされ、これらの2つの波長間に強度最大波長 λ_m が存在する。

【0094】・強度最大波長が長波長側に変動する場合の制御

システム運用開始前に、モニタ成分強度が最大になる波長 λ_m を検出し、零分散波長 $(\lambda_m - \Delta\lambda)$ を挟む2つの光源波長 λ_2, λ_3 ($\lambda_2 < \lambda_3$) を求め、モニタ成分強度が小さい波長 λ_2 の光を主信号光、波長 λ_3 の光をモニタ光とする。そして、システム運用中、零分散波長が長波長側に変動して $I(\lambda_2 + \Delta\lambda) = I(\lambda_3 + \Delta\lambda)$ となれば波長 λ_3 のモニタ光を主信号光に、波長 λ_2 の主信号光をモニタ光に切り替える。零分散波長が更に長波長側に変動して、 $I(\lambda_2 + \Delta\lambda)$ 、 $I(\lambda_3 + \Delta\lambda)$ が共に減少すれば、波長 λ_2 に替えて波長 λ_4 の光をモニタ光にする。

【0095】・強度最大波長が短波長側に変動する場合の制御

システム運用開始前に、モニタ成分強度が最大になる波長 λ_m を検出し、零分散波長 $(\lambda_m - \Delta\lambda)$ を挟む2つの光源波長 λ_2, λ_3 ($\lambda_2 < \lambda_3$) を求め、モニタ成分強度が小さい波長 λ_3 の光を主信号光、波長 λ_2 の光をモニタ光とする。そして、システム運用中、零分散波長が短波長側に変動して $I(\lambda_2 + \Delta\lambda) = I(\lambda_3 + \Delta\lambda)$ となれば波長 λ_2 のモニタ光を主信号光に、波長 λ_3 の主信号光をモニタ光に切り替える。零分散波長が更に短波長側に変動して、 $I(\lambda_2 + \Delta\lambda)$ 、 $I(\lambda_3 + \Delta\lambda)$ が共に減少すれば、波長 λ_3 に替えて波長 λ_1 の光をモニタ光にする。

図57は強度最大波長を検出して主信号光の切替を制御する光伝送システムの別の構成図であり、図56の光伝送システムと同一部分には同一符号を付している。異なる点は、40GHz信号発生部46を削除し、バンドパスフィルタ43bより40GHz信号を受信機20に入力している点である。

【0096】(i) 特定周波数成分強度が最小値を示す波長を検出し、特定周波数成分強度が最大となる主信号光を光伝送路に送出する実施例

図53の実施例では、特定周波数成分強度が最大になる波長 λ_m を検出し、特定周波数成分強度が最大となる光源波長を有する光を主信号光として光伝送路に送出する場合である。ところで、図58に示すように特定周波数成分強度が最大値を示す波長 λ_m と最小値を示す零分散波長の波長幅を $\Delta\lambda$ とし、特定周波数成分強度特性を $\Delta\lambda$ 右にシフトすると点線で示すようになる。このシフトした特性では、零分散波長はシフト前の強度最大波長になる。そこで、本実施例では特定周波数成分強度が最小値を示す零分散波長を検出し、光伝送路に強度最大波長 λ_m の光を送出するように制御する。この実施例の光伝送システムとしては図56に示す構成を採用できる。ただし、分散付与部47、48は光フィルタ41、42の出力光に $-\Delta\lambda$ に応じた負の波長分散を受信光に付与す

る。このため、第1の光フィルタ41から出力する主信号光の波長 λ_2 は $(\lambda_2 - \Delta\lambda)$ とされ、第2の光フィルタ42から出力するモニタ光の波長 λ_3 は $(\lambda_3 - \Delta\lambda)$ とされ、これらの2つの波長間に零分散波長が存在する。

【0097】・零分散波長が長波長側に変動する場合の制御

システム運用開始前に、モニタ成分強度が最小になる零分散波長 λ を検出し、強度最大波長 $(\lambda + \Delta\lambda)$ を挟む2つの光源波長 λ_2, λ_3 ($\lambda_2 < \lambda_3$) を求め、モニタ成分強度が大きい波長 λ_2 の光を主信号光、波長 λ_3 の光をモニタ光とする。そして、システム運用中、強度最大波長が長波長側に変動して $I(\lambda_2 - \Delta\lambda) = I(\lambda_3 - \Delta\lambda)$ となれば波長 λ_3 のモニタ光を主信号光に、波長 λ_2 の主信号光をモニタ光に切り替える。零分散波長が更に長波長側に変動して、 $I(\lambda_2 - \Delta\lambda)$ 、 $I(\lambda_3 - \Delta\lambda)$ が共に増加すれば、光源波長 λ_2 に替えて光源波長 λ_4 の光をモニタ光にする。

【0098】・強度最大波長が短波長側に変動する場合の制御

システム運用開始前に、モニタ成分強度が最小になる零分散波長 λ を検出し、強度最大波長 $(\lambda + \Delta\lambda)$ を挟む2つの光源波長 λ_2, λ_3 ($\lambda_2 < \lambda_3$) を求め、モニタ成分強度が大きい波長 λ_3 の光を主信号光、波長 λ_2 の光をモニタ光とする。そして、システム運用中、強度最大波長が短波長側に変動して $I(\lambda_2 - \Delta\lambda) = I(\lambda_3 - \Delta\lambda)$ となれば波長 λ_2 のモニタ光を主信号光に、波長 λ_3 の主信号光をモニタ光に切り替える。強度最大波長が更に短波長側に変動して、 $I(\lambda_2 - \Delta\lambda)$ 、 $I(\lambda_3 - \Delta\lambda)$ が共に増加すれば、波長 λ_3 に替えて波長 λ_1 の光をモニタ光にする。

【0099】(j) モニタ光として2波を用いる場合の実施例

以上では、主信号光とモニタ光の2波用いて零分散波長を検出し、かつ、主信号光、モニタ光の切替制御する場合であるが、本実施例では主信号光と2つのモニタ光の3波を用いて零分散波長の検出及び主信号光、モニタ光の切替制御をする。図59は3波を用いる場合の零分散波長の検出及び主信号光、モニタ光の切替制御の原理説明図である。主信号光と2つのモニタ光の3波の波長を $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ($\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$) とする。

①零分散波長 λ が長波長側に移動して $\lambda > \lambda_3$ となれば(図59(a))、モニタ光の波長を λ_1 から λ_4 に切り替える。

②また、零分散波長 λ が、 $\lambda_2 < \lambda < \lambda_3$ の範囲に存在し(図59(b))、零分散波長 λ が $(\lambda_3 - \lambda_2)/2$ になればモニタ光を主信号光に、主信号光をモニタ光に切り替える。たとえば、零分散波長 λ が長波長側に移動して $(\lambda_3 - \lambda_2)/2$ になれば波長 λ_3 のモニタ光を主信号光に、波長 λ_2 の主信号光をモニタ光に切り替える。零分散波長 λ

が短波長側に移動して $(\lambda_3 - \lambda_2)/2$ になれば波長 λ_2 のモニタ光を主信号光に、波長 λ_3 の主信号光をモニタ光に切り替える。

【0100】③同様に、零分散波長 λ が、 $\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$ の範囲に存在し(図59(c))、零分散波長 λ が $(\lambda_2 - \lambda_1)/2$ になればモニタ光を主信号光に、主信号光をモニタ光に切り替える。たとえば、零分散波長 λ が長波長側に移動して $(\lambda_2 - \lambda_1)/2$ になれば波長 λ_2 のモニタ光を主信号光に、波長 λ_1 の主信号光をモニタ光に切り替える。零分散波長 λ が短波長側に移動して $(\lambda_2 - \lambda_1)/2$ になれば波長 λ_1 のモニタ光を主信号光に、波長 λ_2 の主信号光をモニタ光に切り替える。

④また、零分散波長 λ が短波長側に移動して $\lambda < \lambda_1$ となれば(図59(d))、モニタ光の波長を λ_4 から λ_1 に切り替える。

【0101】図60は主信号光と2つのモニタ光の3波を用いて波長分散補償する光伝送システムの構成図であり、図41の光伝送システムと同一部分には同一符号を付している。異なる点は、

①3つの光減衰器を開いて隣接する3つの光源より主信号光、2つのモニタ光を合波して光伝送路に送出する点、

②第3の光フィルタ61を設け、該光フィルタの中心波長として第2のモニタ光の波長を設定する点、

③第3の分散モニタ部62を設け、第2のモニタ光に含まれる40GHz成分強度を測定する点、

④分散補償制御部45は、主信号光、第1、第2のモニタ光の3波に含まれる40GHz成分強度に基づいて主信号光の切替制御、モニタ光の切替制御を行う点、である。

【0102】図61は3波を用いる場合におけるシステム運用開始前の波長分散補償処理(初期設定)のフローである。システム運用開始前、出力波長制御部13は光減衰器14₁～14_nの順番で開閉を行う。又、分散補償制御部45は該開閉と連動させながら第1の光フィルタ41の波長を制御し、かつ、パワーメータ43dの測定値である40GHz成分強度を読み込む(ステップ301)。

分散補償制御部45はこの測定値を用いて40GHz成分強度特性をプロットする(ステップ302)。分散補償制御部45は、40GHz成分強度が最小になる零分散波長 λ を挟む2つの光源波長 λ_2 、 λ_3 及び40GHz成分強度が小さい波長 λ_1 を求め、これら3つの波長 λ_1 ～ λ_3 の40GHz成分強度を読み込み、読み込んだ3つの40GHz成分強度の大小関係を判別する(ステップ303)。ついで、出力波長制御部13は分散補償制御部45からの指示に従って、40GHz成分強度が最小の波長(λ_2)と2番目に小さい波長(λ_3)に対応する2つの光減衰器を開き、第1光フィルタ41の中心波長として最小値の波長 λ_2 を設定し、第2光フィルタ42の中心波長として2番目に小さい波長 λ_3 を設定する(ステップ304)。波長 λ_1 に対応する光減衰器を開き、第3の光フィルタ43の中

心波長として波長 λ_1 を設定する(ステップ305)。

【0103】図62は3波を用いる場合におけるシステム運用開始後の波長分散補償処理のフローである。システム運用に先立って、分散補償制御部45は40GHz成分強度特性より、主信号光を切り替えるための40GHz成分強度比 $I(\lambda_2) : I(\lambda_3)$ を求める(ステップ311)。強度比は1:1.6であるとする。ついで、分散補償制御部45はパワーメータ43d、44d、62dより波長 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 の40GHz成分強度 $I(\lambda_1)$ 、 $I(\lambda_2)$ 、 $I(\lambda_3)$ を読み込み(ステップ312)、その大小を比較し零分散波長が移動していることを認識する(ステップ313)。零分散波長 λ が長波長側に移動して $I(\lambda_1) > I(\lambda_2) > I(\lambda_3)$ となれば、 $\lambda > \lambda_3$ となる(図59(a))、ステップ314)。かかる場合には、モニタ光を光源波長 λ_1 の光から光源波長 λ_4 の光に切り替える(ステップ315)。以後、ステップ312以降の処理を繰り返す。モニター光の切替に際して、光減衰器14₄を開き、光減衰器14₁を閉じ、第2光フィルタ42の中心波長として波長 λ_4 を設定する。

【0104】零分散波長 λ が短波長側に移動して $I(\lambda_1) < I(\lambda_2) < I(\lambda_3)$ となれば、 $\lambda < \lambda_1$ となる(図59(d))、ステップ316)。かかる場合には、モニタ光を光源波長 λ_4 の光から光源波長 λ_1 の光に切り替える(ステップ317)。以後、ステップ312以降の処理を繰り返す。モニター光の切替に際して、光減衰器14₄を開き、光減衰器14₁を閉じ、第2光フィルタ42の中心波長として波長 λ_4 を設定する。一方、 $I(\lambda_1) > I(\lambda_3) \geq I(\lambda_2)$ となれば(図59(b))参照)、零分散波長 λ は、 $\lambda_2 < \lambda < \lambda_3$ となる(ステップ318)。零分散波長 λ が λ_2 、 λ_3 の間にあれば、 $I(\lambda_2)$ を1.6倍して補正し($I(\lambda_2) \times 1.6 \rightarrow I(\lambda_2)$)、補正後の $I(\lambda_2)$ と $I(\lambda_3)$ の大小を比較する(ステップ319)。

【0105】 $I(\lambda_3) \neq I(\lambda_2)$ であれば、ステップ212以降の処理を繰り返し、 $I(\lambda_2) = I(\lambda_3)$ であれば(ステップ320)、主信号光の切り替えを行う。すなわち、モニター光を主信号光に、主信号光をモニター光に切り替える。切り替え手順は後述する。又、 $I(\lambda_2) \leq I(\lambda_1) < I(\lambda_3)$ となれば(図59(c))参照)、零分散波長 λ は、 $\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$ となる(ステップ321)。零分散波長 λ が λ_1 、 λ_2 の間にあれば、 $I(\lambda_1)$ を1.6倍して補正し($I(\lambda_1) \times 1.6 \rightarrow I(\lambda_1)$)、補正後の $I(\lambda_1)$ と $I(\lambda_2)$ の大小を比較する(ステップ322)。 $I(\lambda_2) \neq I(\lambda_1)$ であれば、ステップ312以降の処理を繰り返し、 $I(\lambda_2) = I(\lambda_1)$ であれば(ステップ323)、主信号光の切り替えを行う。すなわち、波長 λ_2 のモニター光を主信号光に、波長 λ_1 の主信号光をモニター光に切り替える。以上は零分散波長が長波長側に移動した場合であるが、短波長側に移動する場合同様に主信号光の切替、モニタ光の切替を行うことができる。

【0106】図63は3波を用いる場合における主信号

光切替制御の処理フロー、図64は主信号光の切替制御説明図である。 $I(\lambda_2)=I(\lambda_3)$ となれば(図62のステップ320)、波長 λ_3 のモニター光を主信号光に、波長 λ_2 の主信号光をモニター光に切り替える。まず、光減衰器14₃、14₁を閉じる(ステップ331、図64の状態a)。ついで、第1光フィルタ41の中心波長を長波長側にシフトし、フィルタ幅W内に波長 λ_2 、 λ_3 が入るように制御する(ステップ332、状態b、c)。状態cにおいて、光減衰器14₃を徐々に開き、光減衰器14₂を徐々に閉じる(ステップ233~235、状態d~f)。そして、光減衰器14₂が完全に閉じれば(状態g)、第1光フィルタ41の中心波長を λ_3 にシフトし(ステップ336、状態h)、これにより、主信号光の切り替えが完了する(ステップ337)。最後に、光減衰器14₁、14₂を開き、かつ、第2光フィルタ42の中心波長として λ_2 を設定する(ステップ338、状態i)。以上により光のパワーを一定に維持しながら主信号光の切り替えができる。

【0107】(k) 波長多重する実施例

(K-1) 波長多重の第1実施例

図65は波長多重光伝送システムに波長分散補償機能を持たせた構成図である。図中、71a~71nは複数のデータ送信部、72は各送信部から出力する波長の異なる光を合波して光伝送路30に送出する合波器、73は光伝送路から受信した光を波長毎に分波する分波器、74a~74nは各波長の光よりデータを識別する受信部、75は多重された波長毎の分散補償制御を個別に行う分散補償制御部、76は分散モニタ信号送信部、77は分散モニタ信号受信部、78はモニタ結果に基づいて各送信部71a~71nの主信号光及びモニタ光の切替制御を行う出力波長制御部である。各送信部71a~71nは、それぞれ異なる波長 $\lambda_{a1} \sim \lambda_{an}$ 、 $\lambda_{b1} \sim \lambda_{bn}$ 、 \dots 、 $\lambda_{n1} \sim \lambda_{nn}$ の光を発生する複数の光源LT、複数の光源から発生する光のうち所定の波長 λ_A 、 λ_B 、 \dots 、 λ_N の光を主信号光とし、波長 λ_{MA} 、 λ_{MB} 、 \dots 、 λ_{MN} の光をモニタ光として光伝送路に出力する光減衰器ATT、主信号光とモニタ光を合波する合波器AWG、40Gb/sのデータにより光を変調する外部変調器EMDを備えている。

【0108】各受信部74a~74nは、基準波長(たとえば零分散波長)と対応する送信部71a~71nの所定光源波長との波長差 $\Delta\lambda_1 \sim \Delta\lambda_n$ により生じる分散 $\Delta d_1 \sim \Delta d_n$ を補償する分散補償器91a~91n、分散補償された主信号光の波長を中心波長として設定される第1の光フィルタ92a~92n、分散補償されたモニタ光の波長を中心波長として設定される第2の光フィルタ93a~93n、分散補償された主信号光に含まれる特定周波数成分強度(40GHz成分強度)を検出して出力する第1の波長分散モニタ部94a~94n、分散補償されたモニタ光に含まれる特定周波数成分強度(40GHz成分強度)を検出して出力する第2の波長分散モニタ部

95a~95n、40Gb/s受信機96a~96nを備えている。分散補償制御部75は、(1)多重された波長毎に個別に分散補償制御を行い、(2)制御結果に基づいて出力波長制御部78に各送信部の主信号光の切替、モニタ光の切替を指示し、かつ、各受信部における第1、第2の光フィルタの中心波長を変更する。出力波長制御部78は分散補償制御部75からの指示に従って、図66に示すように送信部毎に別個に主信号光及びモニタ光の切替を行う。尚、分散補償制御部75による分散補償制御は、図41~図51で説明した方法に従って行われる。

【0109】以上要約すれば、各送信部71a~71nは、複数の光源から発生する光のうち所定の波長を有する光を主信号光として光伝送路に出力すると共に、光伝送路30の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長を検出するために、主信号光の光源に隣接する光源から発生する光をモニタ光として主信号光に合波する。各受信部74a~74nは、基準波長(たとえば零分散波長)と所定の光源波長との波長差により発生する分散を補償する分散補償器91a~91nを備える。分散補償制御部75は該分散補償器から出力する主信号光とモニタ光に含まれる特定周波数成分強度の比が所定値になったことを検出して出力波長制御部78に主信号光、モニタ光の切替を指示する。以上により、波長多重光伝送システムにおいて、多重した波長毎に分散補償機能を持たせることができる。

【0110】図65では主信号光とモニタ光の2波を用いて波長毎の分散補償制御を行った例であるが、主信号光と2つのモニタ光の3波を用いて波長毎の分散補償制御することもできる。すなわち、各送信部71a~71nは、複数の光源から発生する光のうち所定の波長を有する光を主信号光として光伝送路に出力すると共に光伝送路30の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長を検出するために、主信号光の光源に隣接する2つの光源から発生する光をモニタ光として主信号光に合波する。各受信部74a~74nは、基準波長(たとえば零分散波長)と所定の光源波長との波長差により発生する分散を補償する分散補償器を備える。分散補償制御部75は該分散補償器から出力する主信号光、2つのモニタ光に含まれる特定周波数成分強度を比較し、比較結果により最適波長が含まれる波長範囲を検出し、最適波長を挟んだ2波長の強度比が所定値になったことで主信号光、モニタ光の切替を出力波長制御部78に指示する。このようにしても波長多重光伝送システムにおいて、多重した波長毎に波長分散補償機能を持たせることができる。

【0111】(K-2) 波長多重の第2実施例

図67は4波多重伝送する第2実施例の光伝送システムの構成図であり、1つに集約された送信部71、多重された波長毎に設けられ、各波長光よりデータを識別する受信部74a~74dを備えている。又、光伝送路3か

ら受信した光を波長毎に分波する分波器73、各多重波長に共通に設けられた1つのモニタ部75、分散モニタ信号(モニタ結果)を送信する分散モニタ信号送信部76を有している。送信部71は、異なる波長 $\lambda_1 \sim \lambda_n$ の光を発生する複数の光源11 $_1 \sim 11_n$ 、複数の光源から発生する光のうちn個(たとえば4個)の光を主信号光(1個はモニタ光と兼用)として出力する光減衰器14 $_1 \sim 14_n$ 、4個の主信号光を合波すると共に各主信号光を分波する合分波器18、合分波器18より出力する主信号光を40Gb/sのデータでオン/オフして変調する外部変調器12b $_1 \sim 12b_4$ 、各外部変調器から出力する光を合波して光伝送路30に送出する合波器19を備えている。又、送信部71は、分散モニタ信号送信部76から送られてくるモニタ結果を受信する分散モニタ信号受信部77、モニタ結果に基づいて4つの主信号光(モニタ光)の切替制御を行う出力波長制御部78を備えている。

【0112】各受信部74a~74dは零分散波長と4個の光源から発生する主信号光の波長 $\lambda_2 \sim \lambda_5$ との波長差 $\Delta d_1 \sim \Delta d_4$ に応じた分散を補償する分散補償器74a $_1 \sim 74d_1$ 、分散補償された主信号光の波長 $\lambda_2 \sim \lambda_5$ を中心周波数として設定される光フィルタ74a $_2 \sim 74d_2$ 、40Gb/s受信機74a $_3 \sim 74d_3$ を備えている。モニタ部75は、たとえば波長 λ_5 の光を主信号光、波長 λ_4 の光をモニタ光として分散補償制御を行うもので、光フィルタ75a、第1、第2の波長分散モニタ部75b、75c、分散制御部75dを有している。光フィルタ75aの中心周波数として、分散補償された後のモニタ光の波長 λ_4 が設定される。第1の波長分散モニタ部75bは、分散補償された主信号光に含まれる40Ghz成分強度を検出して出力し、第2の波長分散モニタ部75cは、分散補償されたモニタ光に含まれる40Ghz成分強度を検出して出力する。分散補償制御部75dは、主信号光とモニタ光にそれぞれ含まれる40Ghz成分強度を用いて分散補償制御を行い、制御結果に基づいて出力波長制御部78に主信号光(モニタ光)の切替を指示し、又、各受信部における光フィルタ74a $_2 \sim 74d_2$ 及びモニタ部の光フィルタ75aの中心波長を変更する。尚、分散補償制御部75dは、図41~図51で説明した方法に従って分散補償制御を行う。

【0113】出力波長制御部78は分散補償制御部75dからの指示に従って、図68に示すように4個の全主信号光の波長をが短波長側あるいは長波長側に1個づつ1波長間隔分シフトして主信号光及びモニタ光の切替を行う。以上のようにすれば、モニタ専用の光源を追加することなく分散補償制御ができる。尚、分散補償制御は任意の隣接する2つの光をモニタ光、主信号光として分散補償制御することができる。

【0114】(K-3) 第2実施例の第1変形例

図67において、分波器73は受信部74dに波長 λ_5

の主信号光のみを分波した。しかし、分波器73より受信部74dへモニタ光、主信号光の両方を分波するようにもできる。かかる場合には、光伝送システムを図69に示すように構成できる。

【0115】(K-4) 第2実施例の第2変形例

図67では、主信号光とモニタ光の2波を用いて分散補償制御する場合であるが、主信号光と2つのモニタ光の3波を用いて分散補償制御することもできる。この場合、モニタ部75は隣接する3つの光源からの光を主信号光、2つのモニタ光として用いる。すなわち、モニタ部75は、隣接する3つの分散補償器から出力する光に含まれる特定周波数成分強度を比較することにより最適波長が含まれる波長範囲を検出し、最適波長を挟んだ2波長の強度比が設定値になったことで主信号光の切替時期を検出する。又、出力波長制御部78はモニタ部からの切替指示により、4個の全主信号光が短波長側あるいは長波長側に1波長間隔分シフトするように主信号光を切り替える。

【0116】(K-5) 第2実施例の第3変形例

波長多重の第2実施例では、隣接する4つの光源から発生する光を4つの主信号光として使用しているが、1つおきに4つの光源から発生する光を4つの主信号光として使用することができる(図70参照、斜線部の光源からの光を出力)。このようにすれば、図71に示すように4個の全主信号光を短波長側あるいは長波長側の隣の未使用波長へ一括してシフトして全主信号光を切り替えることが可能になる。第3変形例では、信号伝送に使用していない波長へ切替を行うため、切替制御が容易になる。

【0117】(K-6) 波長多重の第3実施例

図72は送信部の光源として波長可変光源を用いた場合の第3実施例の光伝送システムの構成図である。図中、71a~71nは複数のデータ送信部、72は各送信部から出力する波長の異なる光を合波して光伝送路30に送出する合波器、73は光伝送路から受信した光を波長毎に分波する分波器、74a~74nは各波長の光よりデータを識別する受信部、75は多重された波長毎の分散補償制御を個別に行う分散補償制御部、76は分散モニタ信号送信部、77は分散モニタ信号受信部、78はモニタ結果に基づいて各送信部71a~71nから出力する光の波長を制御する出力波長制御部である。各送信部71a~71nは、波長可変の光を出力する波長可変光源WVLと40Gb/sのデータにより光を変調する外部変調器EMDを備えている。

【0118】各受信部74a~74nは、基準波長(たとえば零分散波長)と対応する送信部71a~71nの波長可変光源WVLから出力する光の波長 $\lambda_a \sim \lambda_n$ との波長差 $\Delta \lambda_1 \sim \Delta \lambda_n$ により生じる分散 $\Delta d_1 \sim \Delta d_n$ を補償する分散補償器91a~91n、分散補償された光の波長 $\lambda_a \sim \lambda_n$ を中心波長として設定される光フィルタ9

2a~92n、分散補償された光に含まれる特定周波数成分強度(40GHz成分強度)を検出して出力する波長分散モニタ部94a~94n、40Gb/s受信機96a~96nを備えている。波長分散モニタ部94a~94nは、フォトダイオード(PD)、バンドパスフィルタ(BPF)、アンプ、パワーメータで構成されている。

【0119】分散補償制御部75は、(1)多重された波長 $\lambda_A \sim \lambda_N$ 毎に個別に分散補償制御を行い、(2)制御結果に基づいて出力波長制御部78に各送信部71a~71nから出力する光の波長を指示し、かつ、各受信部における光フィルタ92a~92nの中心波長を変更する。例えば、分散補償制御部75は出力波長制御部78を介して、送信部毎に個別に、波長可変光源WVLから出力する光の波長を変えて受信光のベースバンドスペクトラム信号に含まれる特定周波数成分強度が最小となる最適波長を検出し、該最適波長の光を出力するよう出力波長制御部78に波長切替を指示する。出力波長制御部78は分散補償制御部75からの指示に従って送信部毎に個別に波長可変光源WVLから出力する光の波長を制御する。以上では、各受信部74a~74nに波長分散モニタ部94a~94nを設け、分散制御部75が各送信部71a~71nの波長を個別に制御した場合であるが、波長分散モニタ部を1つの受信部にのみ設け、各送信部71a~71nの波長を共通に制御するように構成することもできる。図73はかかる変形例の光伝送システムの構成図であり、受信部74nにのみ波長分散モニタ部94nが設けられている。

【0120】分散補償制御部75は、出力波長制御部78を介して、送信部71nの波長可変光源WVLから出力する光の波長を変えて受信光のベースバンドスペクトラム信号に含まれる特定周波数成分強度が最小となる最適波長を検出し、それまでの最適波長との差 $\Delta\lambda$ を計算し、各送信部71a~71nから出力する光の波長を $\Delta\lambda$ だけ変更するように出力波長制御部78に指示する。出力波長制御部78は分散補償制御部75からの指示に従って各送信部の波長可変光源WVLから出力する光の波長が $\Delta\lambda$ 変化するように制御する。以上、本発明を実施例により説明したが、本発明は請求の範囲に記載した本発明の主旨に従い種々の変形が可能であり、本発明はこれらを排除するものではない。

【0121】

【発明の効果】以上本発明によれば、波長可変レーザを用いなくても、光伝送路の波長分散に対して伝送特性が最適になる波長の光を光伝送路に出力して分散補償することができる。本発明によれば、半導体アレイレーザや複数の単体の半導体レーザのように、波長の異なる複数の光源を用いても波長切替時に信号遮断が生じないようにすることができる。本発明によれば、合波器、アレイ導波路格子(AWG)、スターカプラ、波長可変フィルタあるいは光減衰器などを用いて簡単に光伝送路に出力

する光の波長を変更して分散補償することができる。

【0122】本発明によれば、波長の異なる複数の光源を用いる場合であっても、零分散波長を検出して精度良く伝送路の分散補償ができる。本発明によれば、波長の異なる複数の光源を用いる場合であっても、零分散波長が隣接光源波長の中間値になったとき、光伝送路に出力する光の光源を切り替えるようにしたから、波長切替前後の信号遅延を零あるいは小さくでき、信号劣化を防止することができる。本発明によれば、出力光の波長を微小振動することにより零分散波長を求めて経年変化による波長分散補償を行うことができる。、本発明によれば、主信号光にモニター光を合波することにより、零分散波長が長波長方向あるいは短波長方向に変動したか、及び零分散波長が隣接光源波長の中間波長になったかを容易に検出することができる。

【0123】本発明によれば、モニタ光の波長を主信号光の波長から充分離すようにしたから、四光波混合(four-wave mixing)が発生しないようにできる。本発明によれば、主信号光にモニター光を合波して送信する場合、主信号光とモニター光間の偏波を直交させるため、零分散波長の変動方向などの検出精度を向上することができる。本発明によれば、主信号光と2つのモニタ光の3波を用いて分散補償制御をするようにしたから、各波長の特定成分強度の増減を常にモニタする必要がなく、ある時間における3波の特定成分強度の絶対値を比較するだけで良く、分散補償制御を容易に行うことができる。本発明によれば、特定周波数成分強度特性がNRZ変調方式、OTDM変調方式、RZ変調方式などの光変調方式により異なる場合でも、NRZ変調方式では、特定周波数成分強度特性のピークの麓の最小部分を検出することで、OTDM変調方式では2つのピーク間の谷部分を検出することで、RZ変調方式では最大値を検出することで、分散補償制御をおこなうことができる。本発明によれば、波長多重伝送に際して分散補償制御ができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1の原理図説明図である。

【図2】本発明の第2の原理図説明図である。

【図3】本発明の第3の原理図説明図である。

【図4】波長と遅延時間の関係図である。

【図5】光源切替方法説明図である。

【図6】光源波長切替時のレーザ注入電流制御法説明図である。

【図7】光源最大波長間隔と分散補償量精度の関係図である。

【図8】複数の光源を持つ光送信機の第1の構成例(光源として半導体レーザを備え、合波にアレイ導波路格子を使用)である。

【図9】複数の光源を持つ光送信機の第2の構成例(光源として半導体レーザを備え、合波にスターカプラを使用)である。

【図10】複数の光源を持つ光送信機の第3の構成例（光源として半導体レーザを備え、変調器にMI-DFB-LD型を使用）である。

【図11】複数の光源を持つ光送信機の第4の構成例（光源として半導体アレイレーザを備え、合波にアレイ導波路格子を使用）である。

【図12】複数の光源を持つ光送信機の第5の構成例（光源として半導体アレイレーザを備え、合波にスターカップラを使用）である。

【図13】最適波長が既知の場合において分散補償する実施例である。

【図14】最適波長が既知の場合において分散補償する実施例の変形例（多中継伝送）である。

【図15】最適波長が未知の場合において分散補償する実施例である。

【図16】分散モニタ信号のフィードバック構成図である。

【図17】最適波長が未知の場合において波長変化が小さい場合に分散補償する実施例の変形例（伝送路がSMFの場合）である。

【図18】最適波長が未知の場合において波長変化が小さい場合に分散補償する別の実施例（光減衰器使用）である。

【図19】最適波長が未知の場合において波長変化が小さい場合に分散補償する別の実施例（波長可変フィルタ使用）である。

【図20】波長可変フィルタの構成図である。

【図21】波長可変フィルタのチューニング特性図である。

【図22】最適波長が未知の場合において波長変化が大きい場合に分散補償する実施例（波長振動）である。

【図23】ATC回路である。

【図24】波長とモニタ成分強度の関係図である。

【図25】最適波長が未知の場合において波長変化が大きい場合に分散補償する別の実施例（波長振動、光減衰器使用）である。

【図26】最適波長が未知の場合において波長変化が大きい場合に分散補償する別の実施例（波長振動、波長可変フィルタ使用）である。

【図27】零分散波長の変動方向などの検出原理説明図である。

【図28】最適波長が未知の場合において波長変化が大きい場合に分散補償する実施例（モニタ光使用）である。

【図29】システム運用時の波長分散補償処理フローである。

【図30】長波長側への波長切替制御説明図である。

【図31】短波長側への波長切替制御説明図である。

【図32】フィルタ幅範囲説明図である。

【図33】モニタ光と主信号光の波長関係説明図であ

る。

【図34】パルス間隔から波長分散量を算出する波長分散モニター部を用いた実施例である。

【図35】波長分散量を算出する原理説明図である。

【図36】パルス間隔から波長分散量を算出する波長分散モニター部を用いた実施例の変形例である。

【図37】最適波長が未知の場合において波長変化が大きい場合に分散補償する実施例（モニタ光使用、光減衰器使用）である。

【図38】最適波長が未知の場合において波長変化が大きい場合に分散補償する実施例（モニタ光使用、波長可変フィルタ使用）である。

【図39】主信号光とモニタ光を直交させる実施例である。

【図40】波長切替ポイント検出説明図である。

【図41】光伝送システムの構成図である。

【図42】波長分散補償処理フロー（初期設定）である。

【図43】零分散波長が長波長側へ移動している場合の分散補償処理の説明図である。

【図44】零分散波長が長波長側へ移動する場合における波長分散補償処理フロー（モニタ光切替、主波長切替指示）である。

【図45】零分散波長が長波長側へ移動する場合の波長分散補償処理フロー（主波長切替制御）である。

【図46】主信号光の切替制御説明図である。

【図47】最適波長検出に2波用いた場合の実験結果である。

【図48】零分散波長が短波長側へ移動する場合における波長分散補償処理フロー（モニタ光切替、主波長切替指示）である。

【図49】零分散波長が短波長側へ移動する場合における説明図である。

【図50】零分散波長が短波長側へ移動する場合における波長分散補償処理フロー（主波長切替制御）である。

【図51】主信号光の切替制御説明図である。

【図52】各変調での成分強度特性図である。

【図53】特定周波数成分強度が最大値を示すように主信号光を制御する実施例の説明図である。

【図54】強度最大波長の変動方向説明図である。

【図55】強度成分の山を使う2波長用いる場合の原理説明図である。

【図56】強度最大波長を検出して主信号光の切替を制御する光伝送システムの構成図である。

【図57】強度最大波長を検出して主信号光の切替を制御する光伝送システムの変形例である。

【図58】特定周波数成分強度が最小値を示す波長を検出し、特定周波数成分強度が最大となる主信号光を光伝送路に送出する場合の説明図である。

【図59】最適波長検出に3波用いる場合の説明図であ

る。

【図60】主信号光と2つのモニタ光の3波を用いて波長分散補償する光伝送システムの構成図である。

【図61】3波用いる場合の波長分散補償処理フロー（初期設定）である。

【図62】3波用いる場合における波長分散補償処理フロー（モニタ光切替、主波長切替指示）である。

【図63】3波を用いる場合の波長分散処理フロー（主波長切替制御）である。

【図64】主信号光切替制御説明図である。

【図65】波長多重光伝送システムの構成図（ n 波長多重）である。

【図66】波長多重した場合の説明図である。

【図67】4波多重する場合の構成図である。

【図68】4波多重する場合の説明図である。

【図69】4波多重する場合の構成図である。

【図70】4波多重する場合の構成図である。

【図71】4波多重の説明図である。

【図72】送信部の光源として波長可変光源を用いた第3実施例の光伝送システムの構成図である。

【図73】第3実施例の変形例である。

【図74】40 Gb/s OTDM（光時分割多重）1.3 μ m 零分散SMF 50km 伝送実験による分散補償量とパワーペナルティの関係及び測定系の説明図である。

【図75】波長分散特性図である。

【図76】NRZ信号での40GHz成分強度とアイ開口度のシミュレーション結果を示す図である。

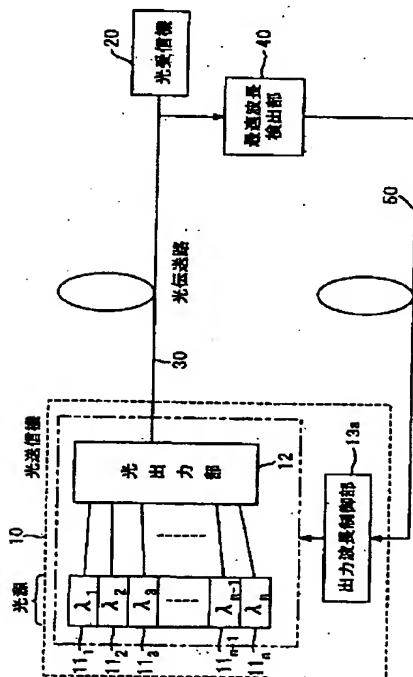
【図77】40Gb/s NRZ信号での波長対40GHz成分強度の温度特性（実験値）である。

【符号の説明】

- 10・・・光送信機
- 11₁～11_n・・・光源
- 12・・・光出力部
- 13・・・出力波長制御部
- 14・・・波長微小振動部
- 15・・・モニター光合波制御部
- 20・・・光受信機
- 30・・・光伝送路
- 40・・・最適波長検出部
- 50・・・光伝送路

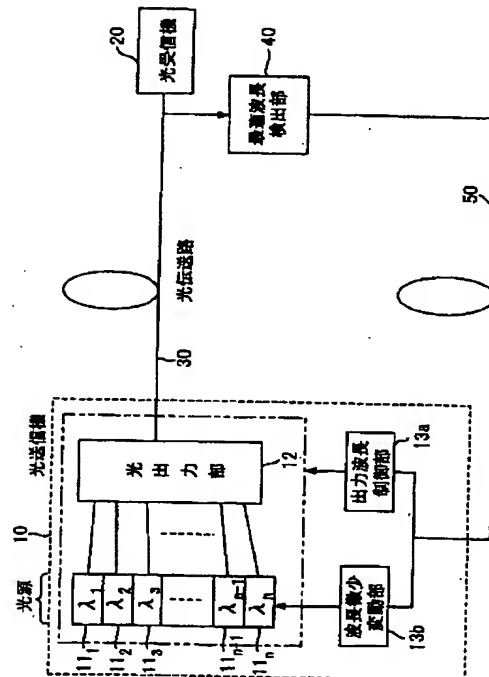
【図1】

本発明の第1の原理説明図



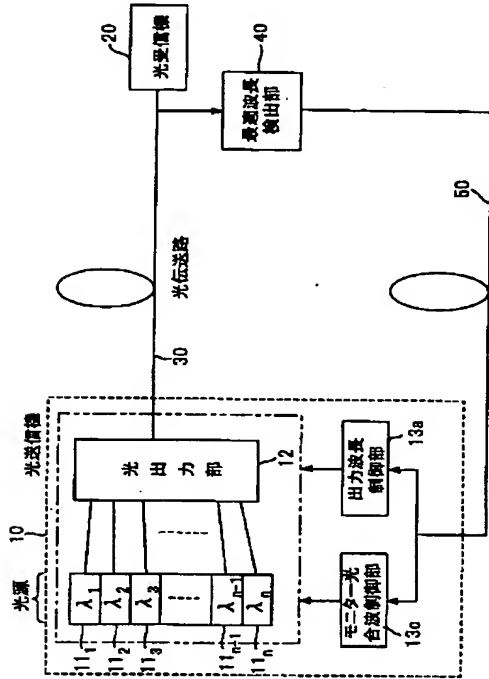
【図2】

本発明の第2の原理説明図



【図3】

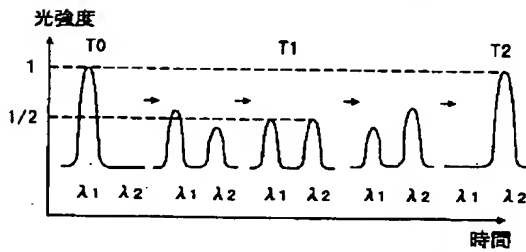
本発明の第3の原理説明図



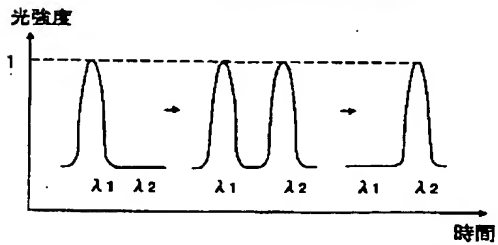
【図5】

光源切替方法説明図

(a) 光出力パワー一定制御法

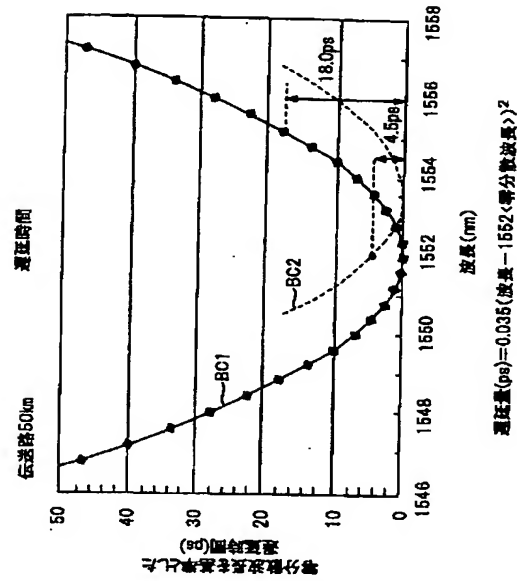


(b) λ1、λ2を同時に発振させる制御法



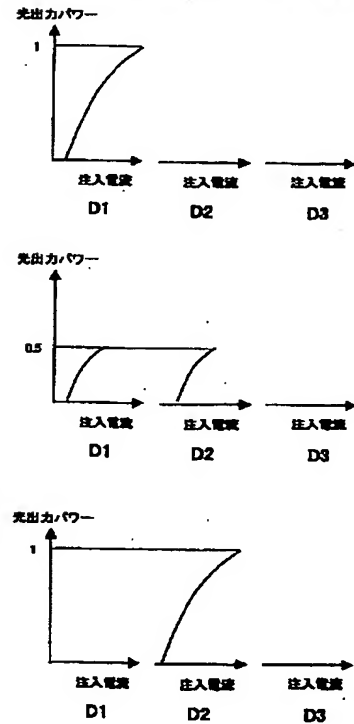
【図4】

波長と遅延時間の関係(シミュレーション値)

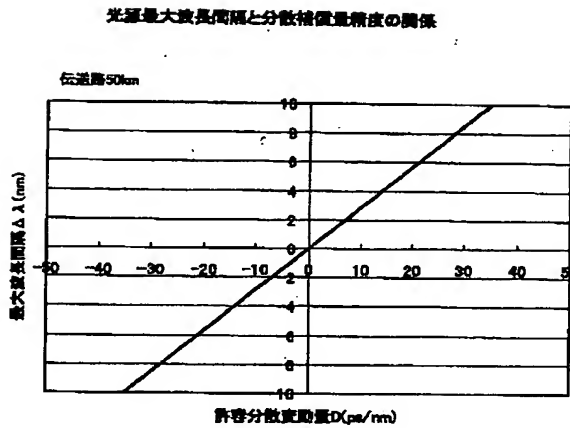


【図6】

光源波長切替時のレーザ注入電流制御法

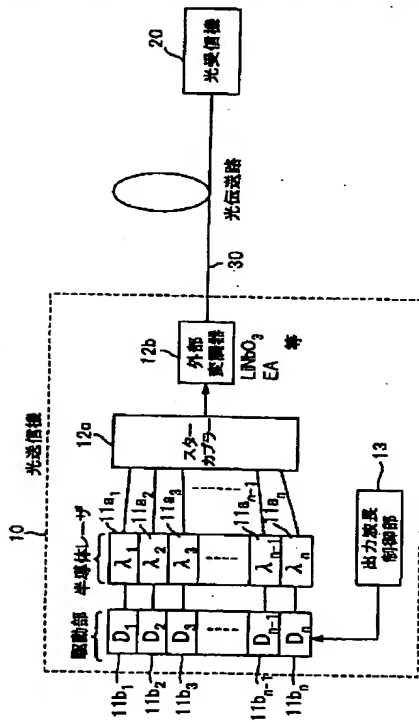


【図7】



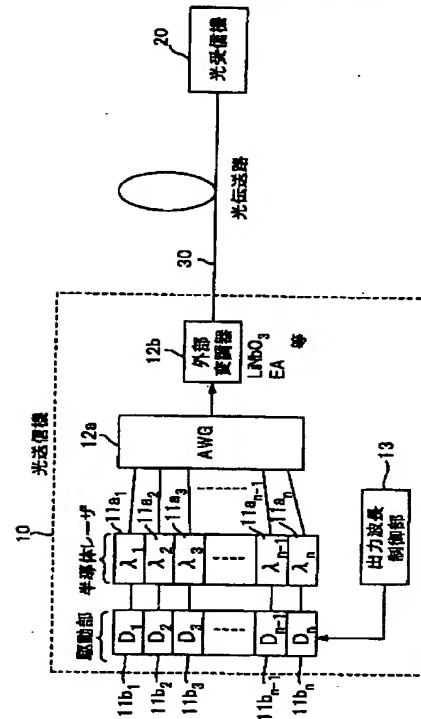
【図9】

複数の光源を持つ光送信機の第2の構成例
(光源として半導体レーザを用い、合波にスターカプラを用いる)



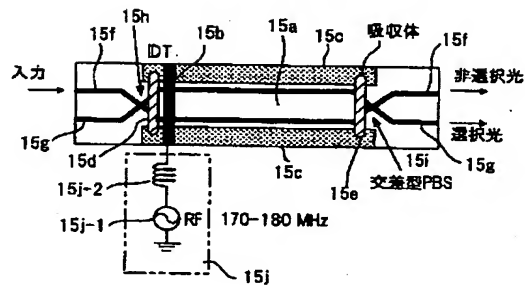
【図8】

複数の光源を持つ光送信機の第1の構成例(光源として半導体レーザを用い、合波にアレイ導波路格子(AWG)を用いる)



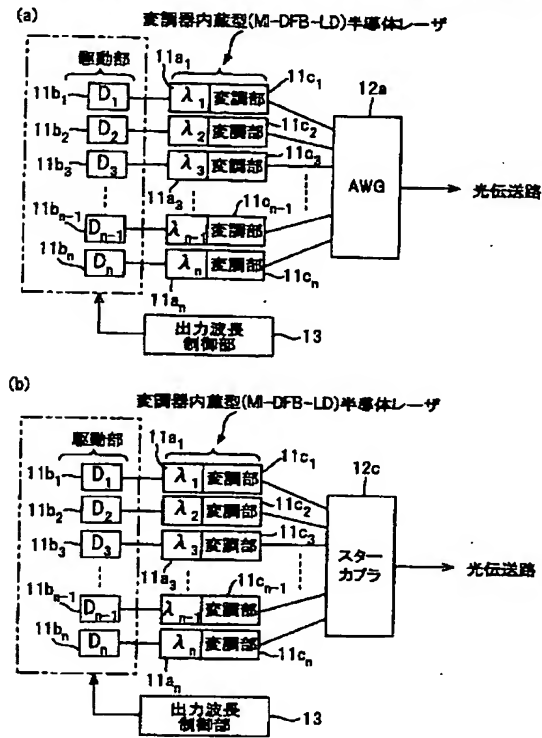
【図20】

波長可変フィルタの構成

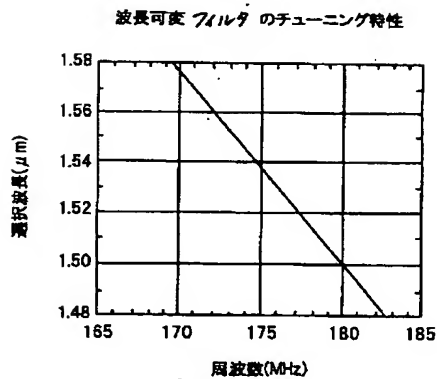


【図10】

複数の光源を持つ光送信機の第3の構成例
(光源として半導体レーザを備え、変調器にM-DFB-LD型を使用する場合)

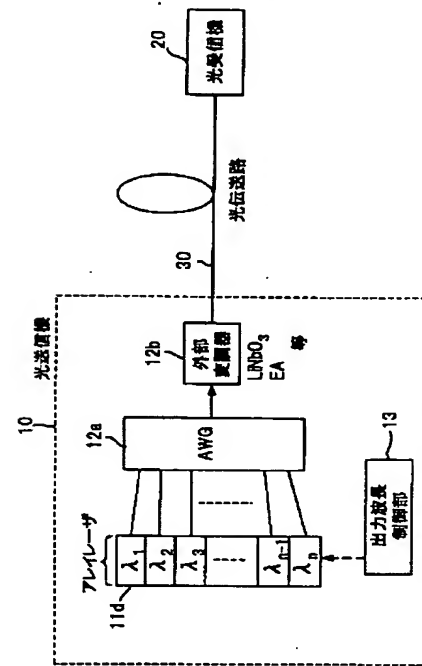


【図21】



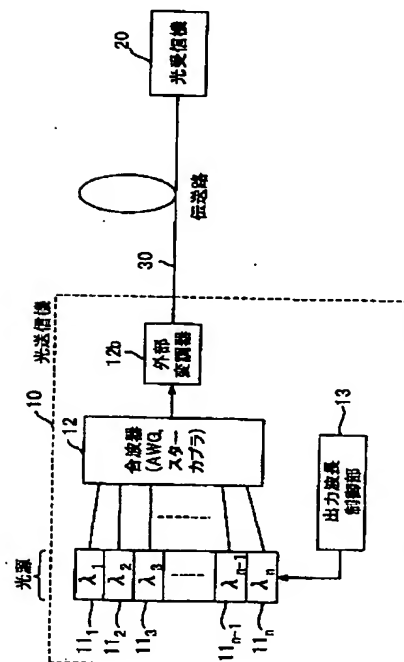
【図11】

複数の光源を持つ光送信機の第4の構成例(光源としてアレイレーザを備え、合波にアレイ導波格子(AWG)を用いる)



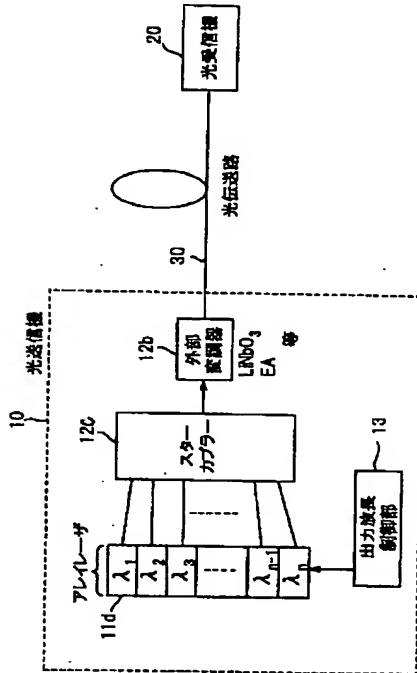
【図13】

最適波長が既知の場合において分散補償する実施例



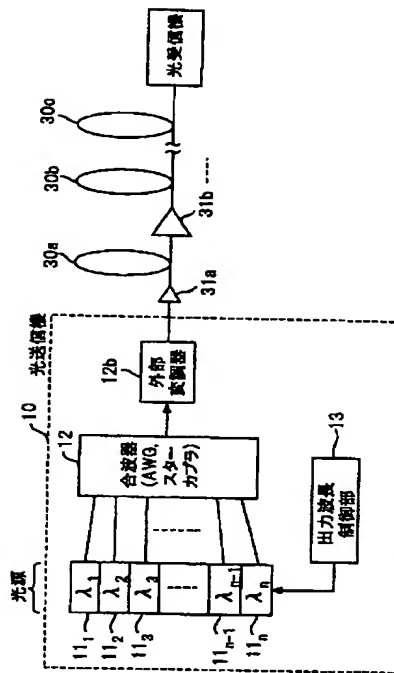
【図12】

複数の光源を持つ光送信機の第5の構成例
(光源としてアレイレーザを備え、合波にスターカプラを用いる)



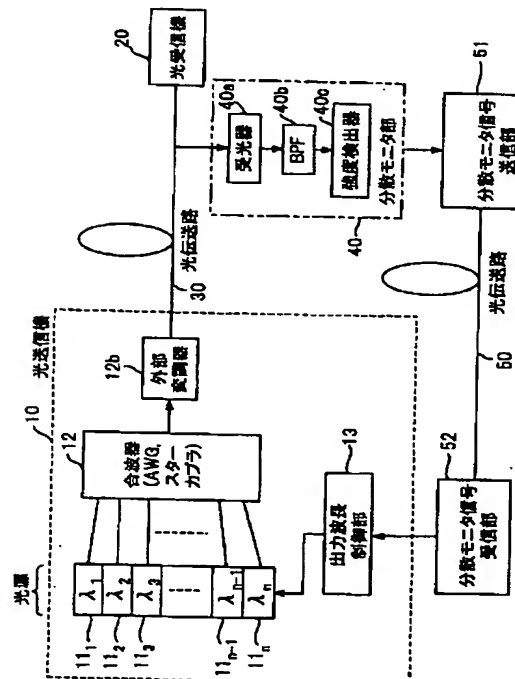
【図14】

最適波長が既知の場合において分散補償する
実施例の直形例(多中継伝送)



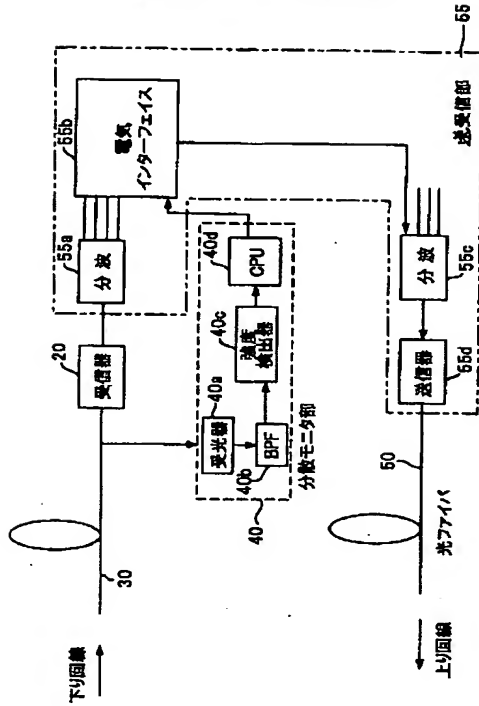
【図15】

最適波長が未知の場合において分散補償する実施例



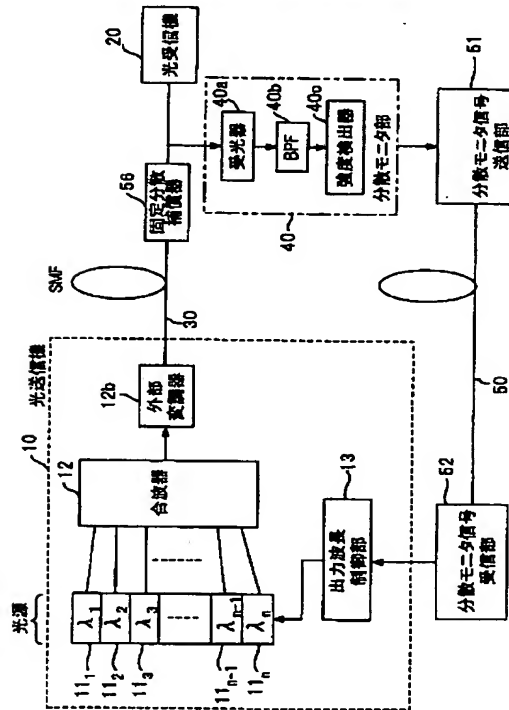
【図16】

分散モニタ信号のフィードバック構成



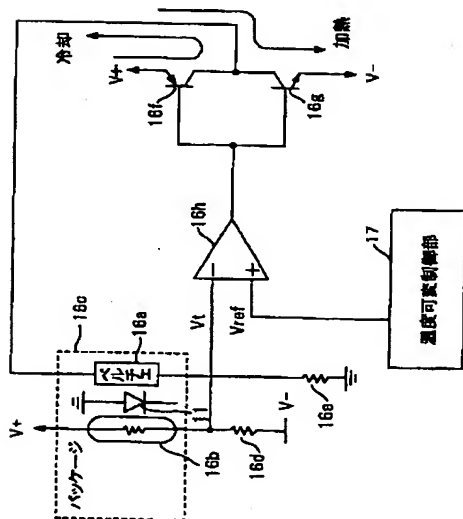
【図17】

最適波長が未知の場合において波長変化が小さい場合に分散補償する実施例の概形例(伝送路がSMFの場合)



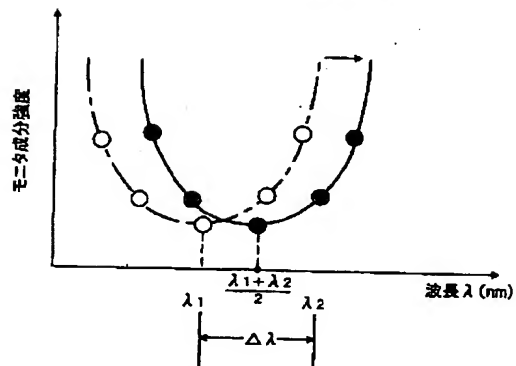
【図23】

ATC回路



【図24】

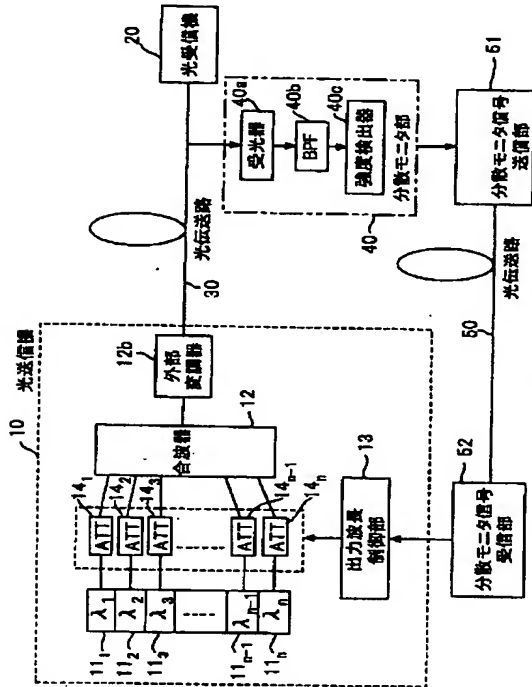
波長とモニター成分強度の関係



零分散波長が長波長側へ変動している場合

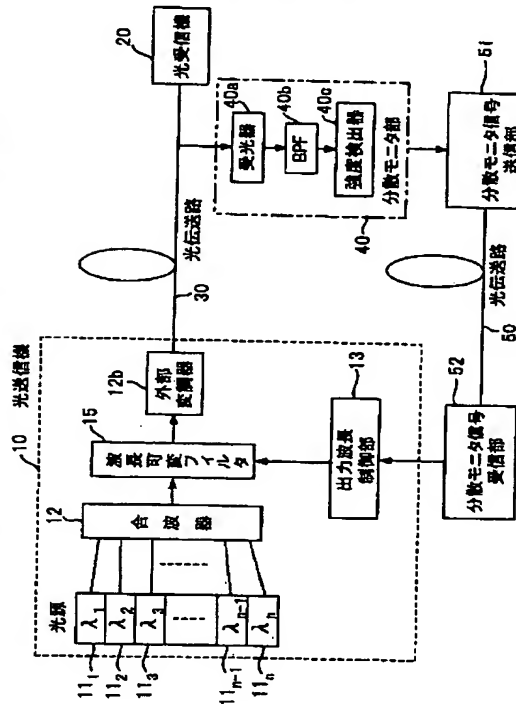
【図18】

最適波長が未知の場合において波長変化が小さい場合に
分散補償する別の実施例(光減衰器使用)



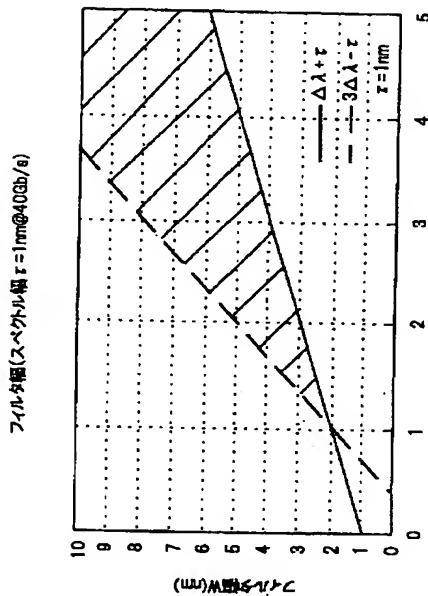
【図19】

最適波長が未知の場合において波長変化が小さい場合に
分散補償する別の実施例(波長可変フィルタ利用)



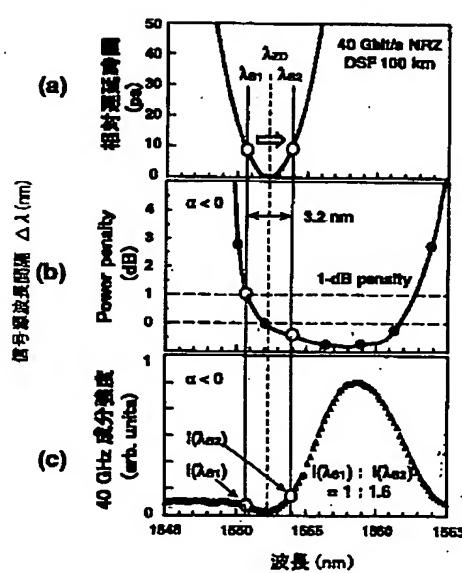
【図32】

フィルタ幅範囲



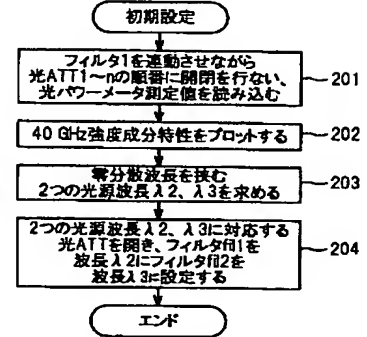
【図40】

波長切替ポイント検出



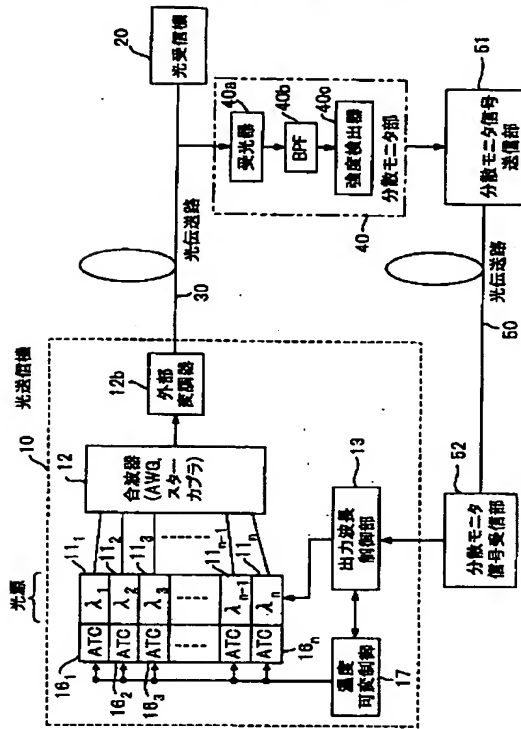
【図42】

波長分散補償処理(初期設定)



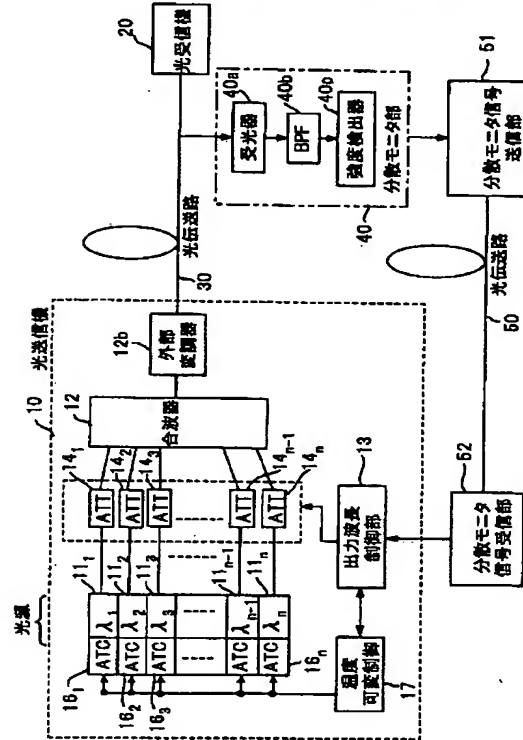
【図22】

最適波長が未知の場合において波長変化が大きい場合に
分散補償する実施例(波長振動)



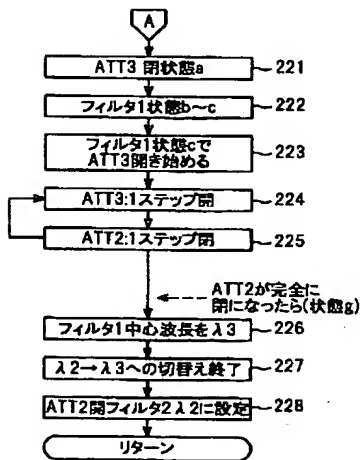
【図25】

最適波長が未知の場合において波長変化が大きい場合に
分散補償する別の実施例(波長振動、光減衰器使用)



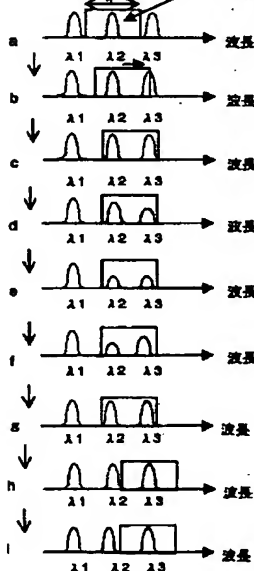
【図45】

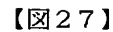
帯分散波長が長波長側へ移動する場合の
波長分散補償処理(主波長切替制御)



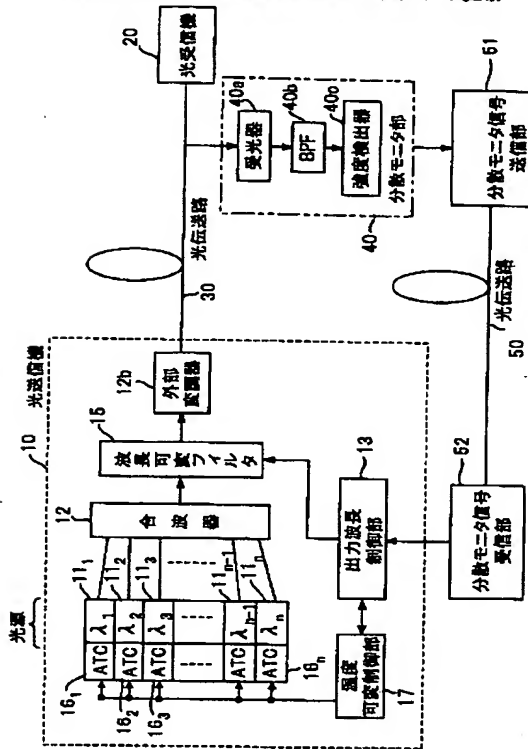
【図46】

主信号光の切替制御説明図
波長可変フィルタ箱 LDからの信号



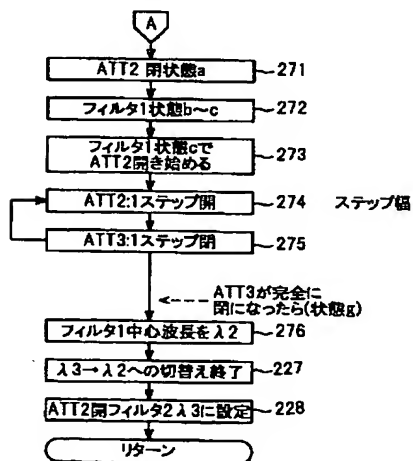


最適波長が未知の場合において波長変化が大きい場合に
分散補償する更に別の実施例(波長振動、可変フィルタ使用)



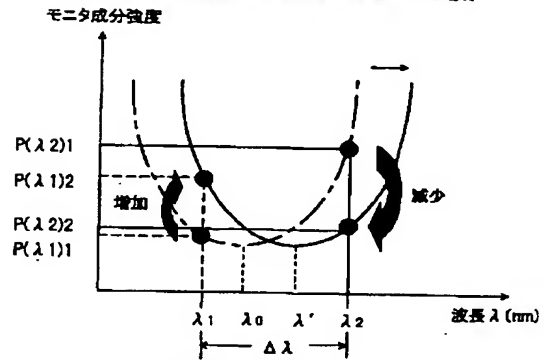
【図50】

零分散波長が短波長側へ移動する場合における
波長分散補償処理(主波長切替制御)

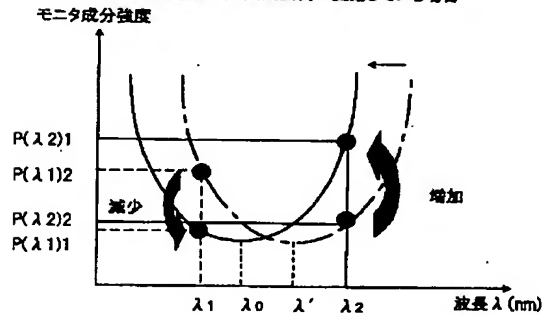


零分散波長変動方向などの検出原理説明図

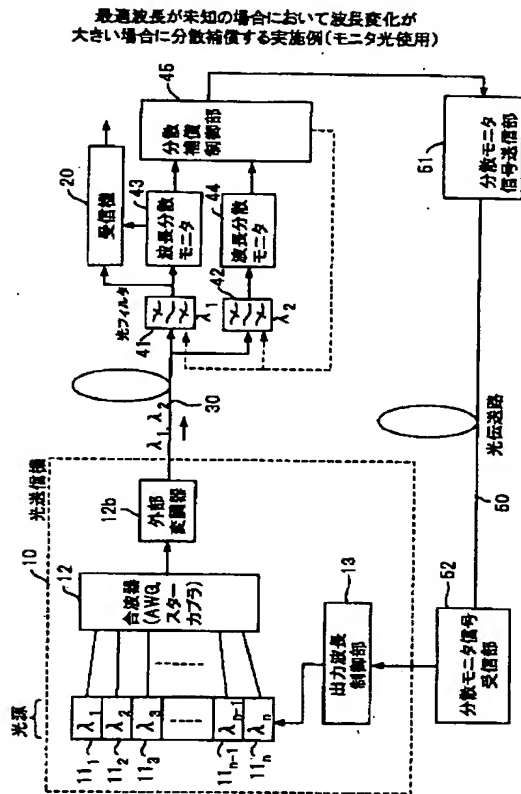
(a) 零分散波長が長波長側へ変動している場合



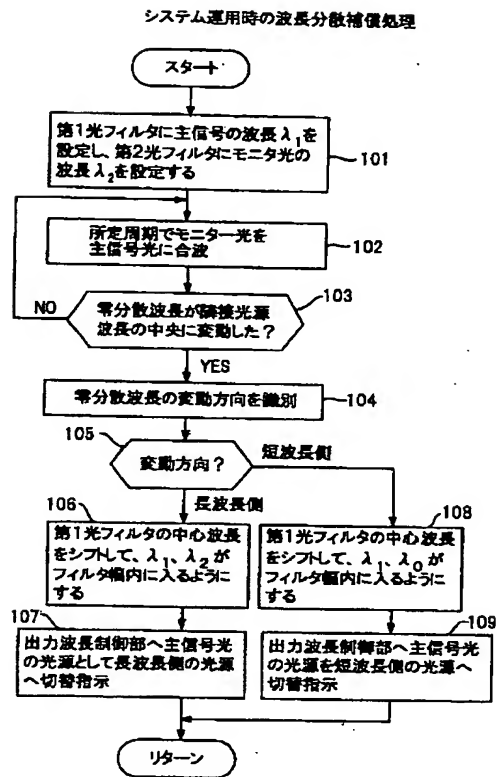
(b) 零分散波長が短波長側へ変動している場合



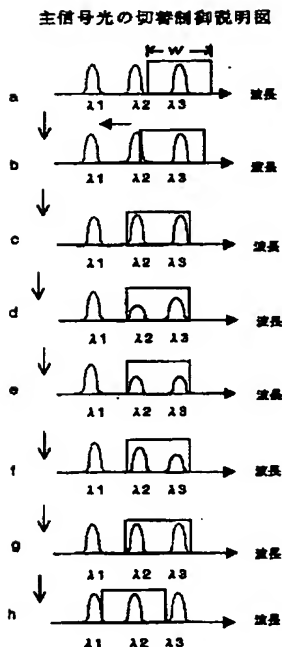
【図28】



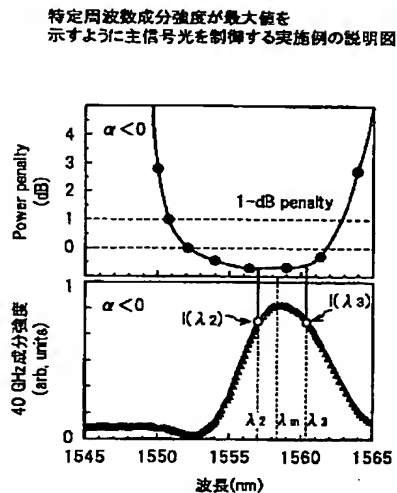
【図29】



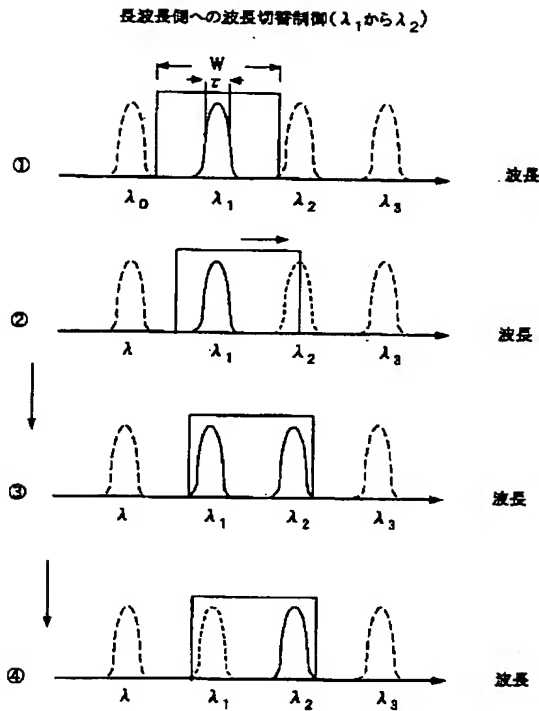
【図51】



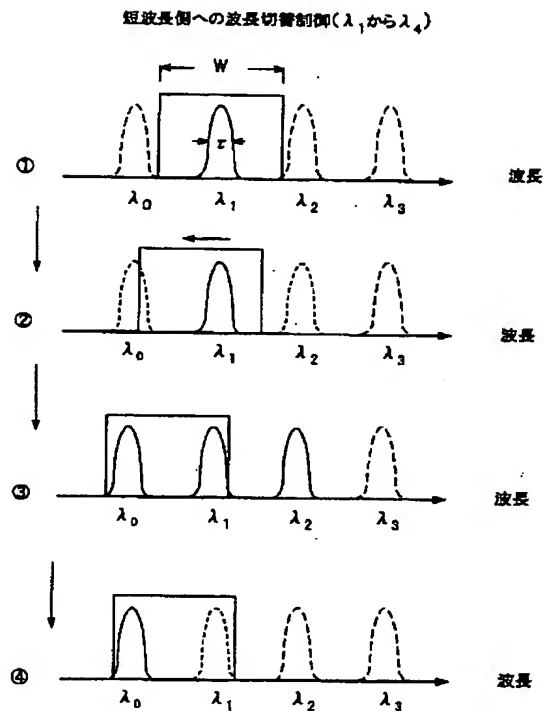
【図53】



【図30】

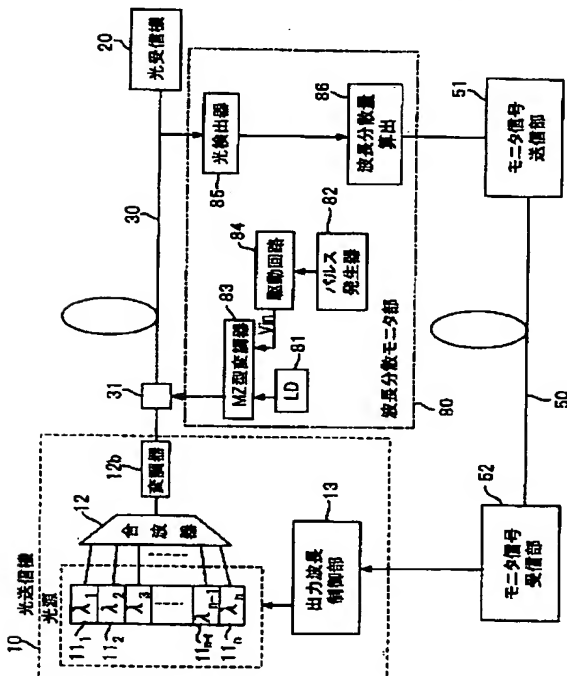


【図31】



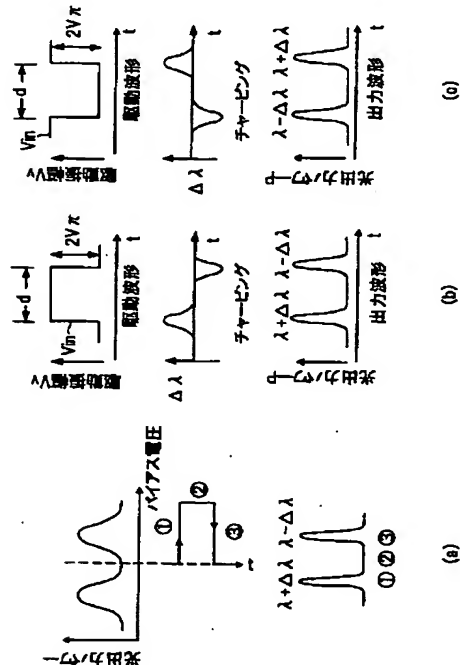
【図34】

パルス間隔差から波長分散量を算出する波長分散モニタ部を用いた実施例構成図



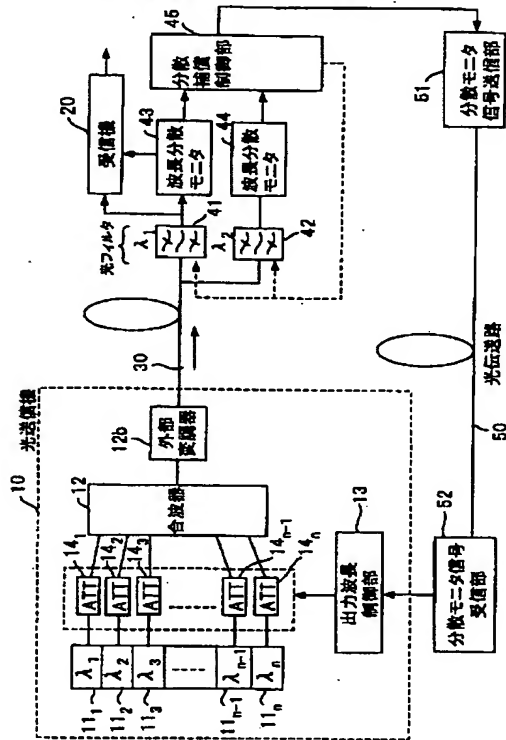
【図35】

1組の半導体レーザと変調器から異なる波長を持つ2つの短パルスを生じさせて波長分散量を算出する原理説明図



【図37】

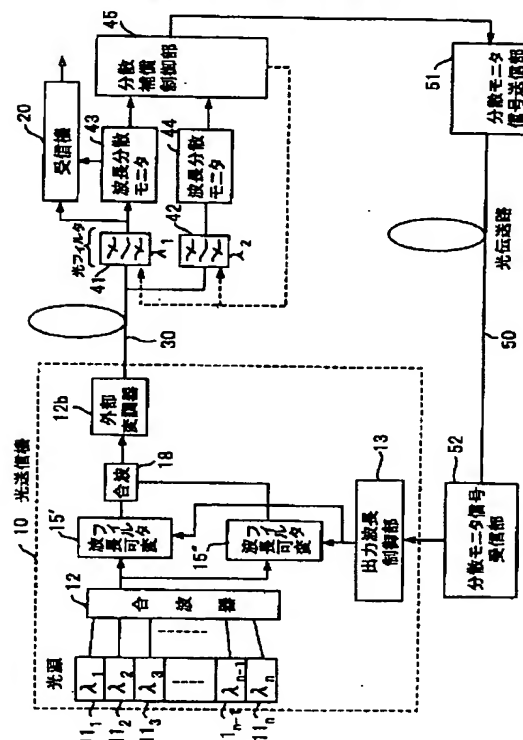
最適波長が未知の場合において波長変化が大きい場合に
分散補償する実施例(モニタ光使用、光減衰器使用)



【图63】

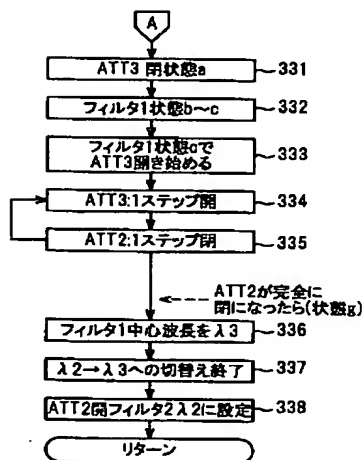
【図38】

最適波長が未知の場合において波長変化が大きい場合に
分散補償する実施例(モニタ光使用、波長可変フィルタ使用)

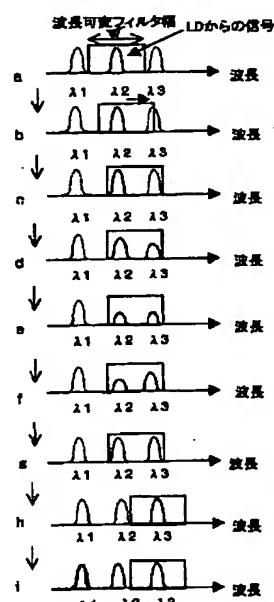


【図66】

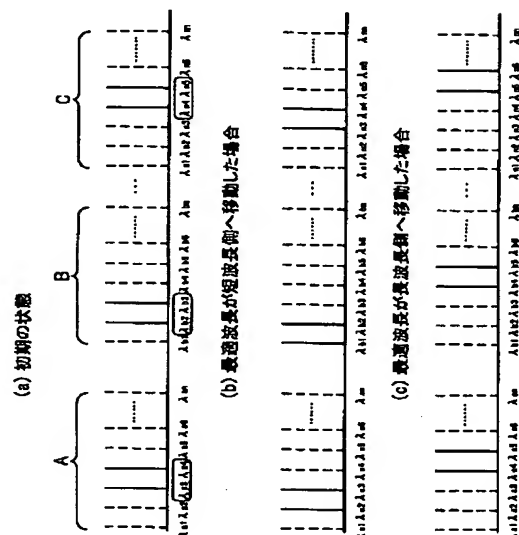
3波を用いる場合の波長分散処理 (主波長切替制御)



主信号光切替制御説明図

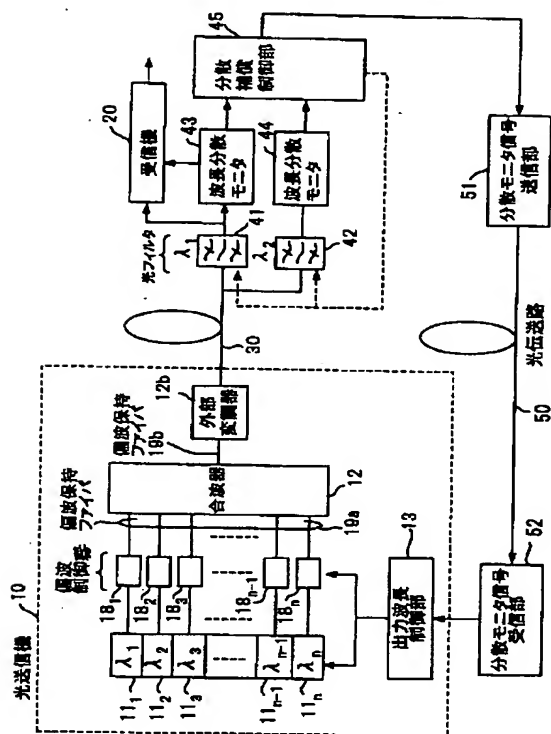


波長多重した場合の説明図



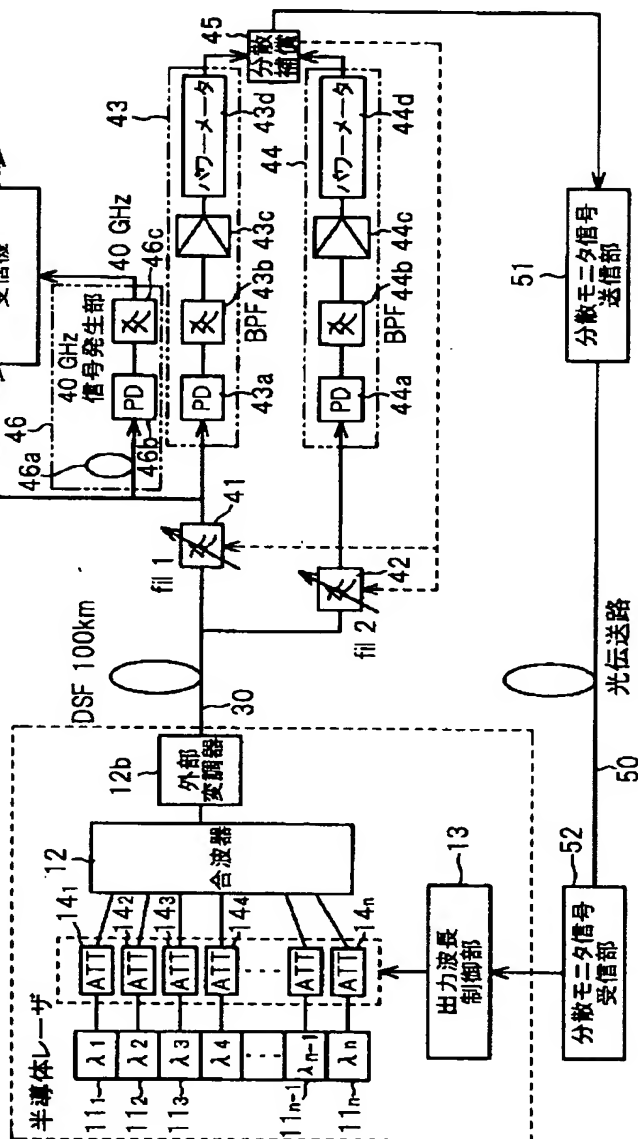
【図39】

主信号光とモニタ光を直交させる実施例



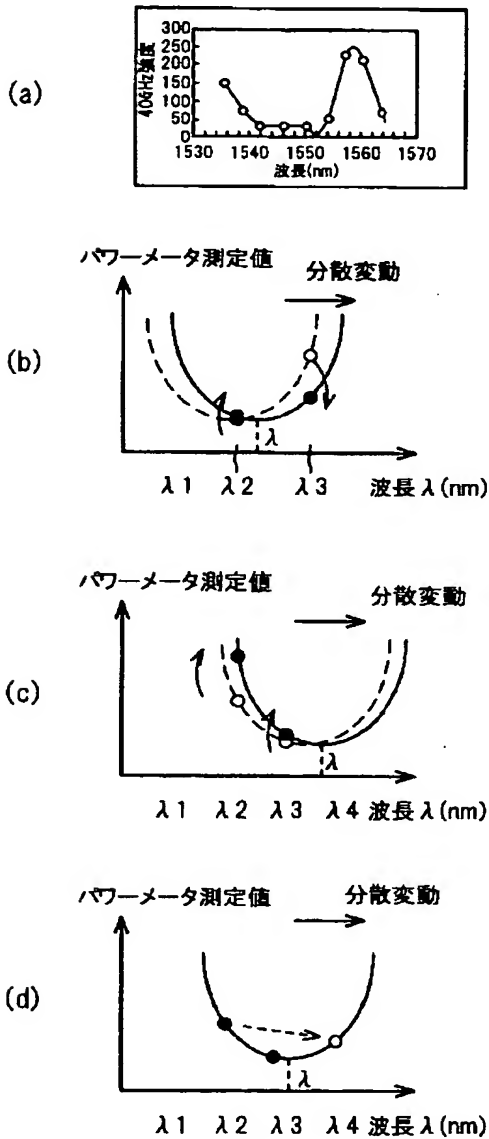
【図41】

光伝送システムの構成



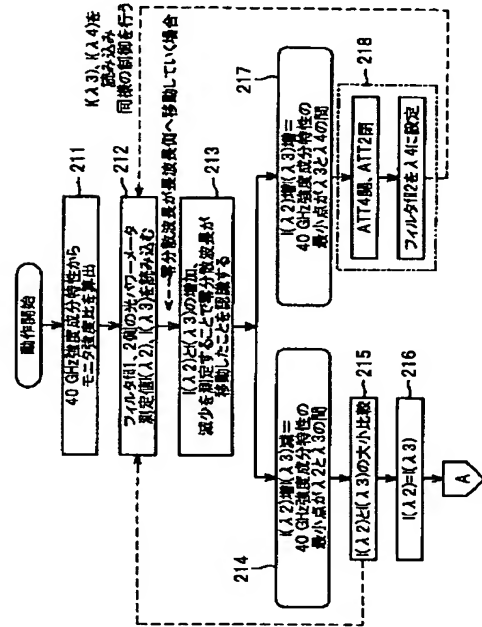
【図43】

零分散波長が長波長側へ移動している場合の
分散補償処理の説明図



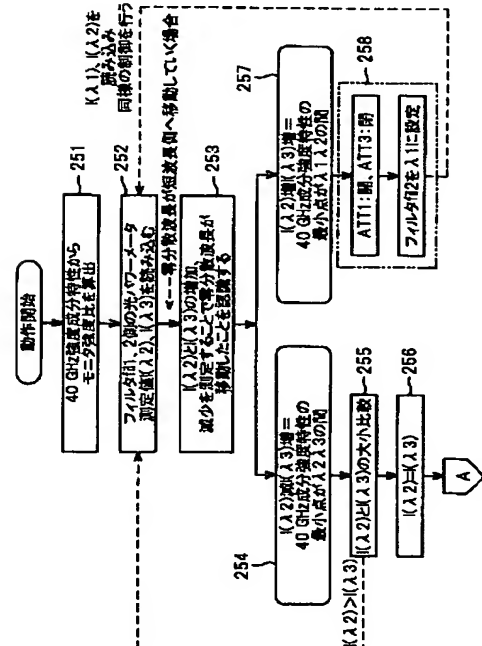
【図44】

零分散波長が長波長側へ移動する場合における
波長分散補償処理(モニタ光切替、主波長切替指示)

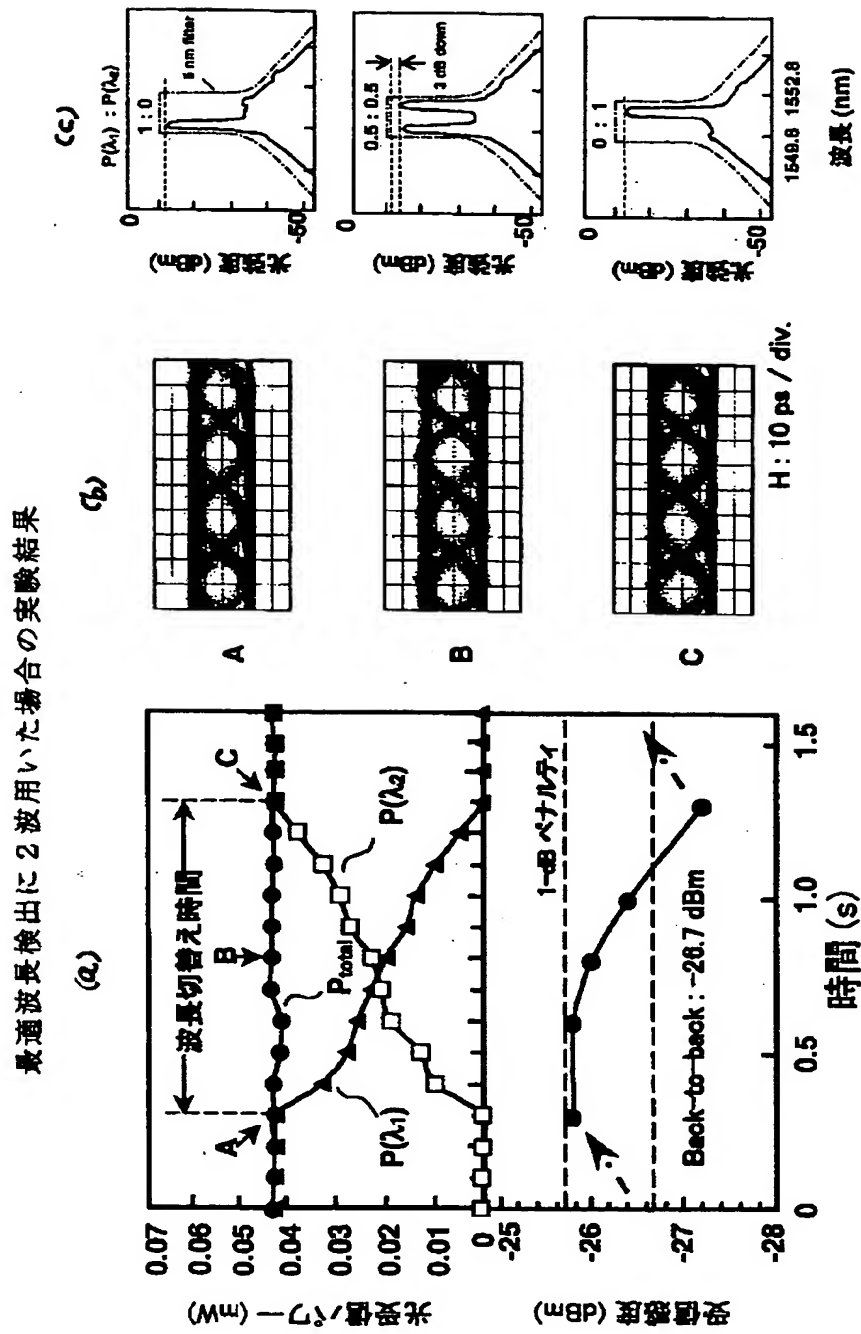


【図48】

零分散波長が短波長側へ
移動する場合における波長分散補償処理
(モニタ光切替、主波長切替指示)

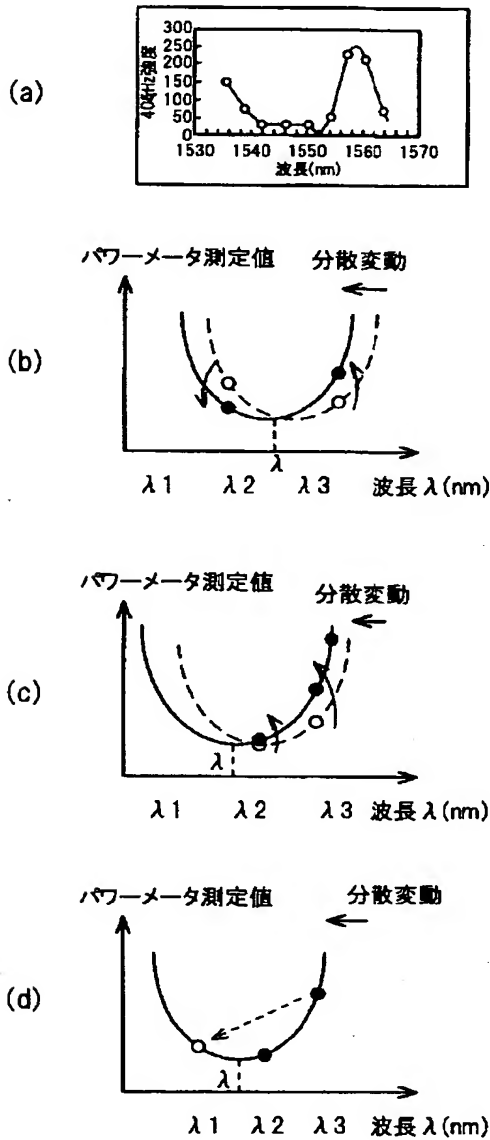


【図47】



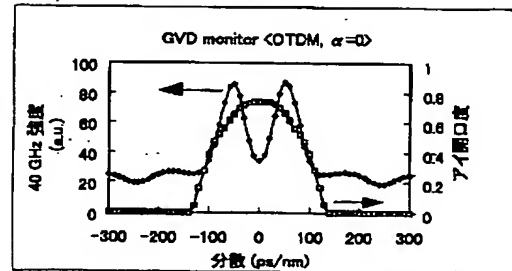
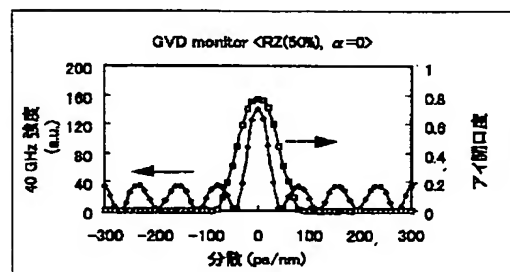
【図49】

零分散波長が短波長側へ移動する場合における説明図



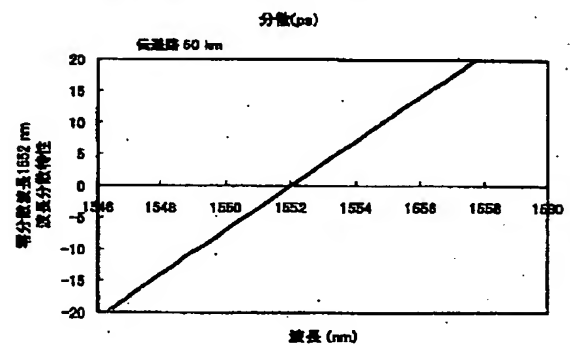
【図52】

各変調での成分強度特性

(a) OTDM変調方式
(2つの山の中心を検出する)(b) RZ変調方式
(最大値を検出する)

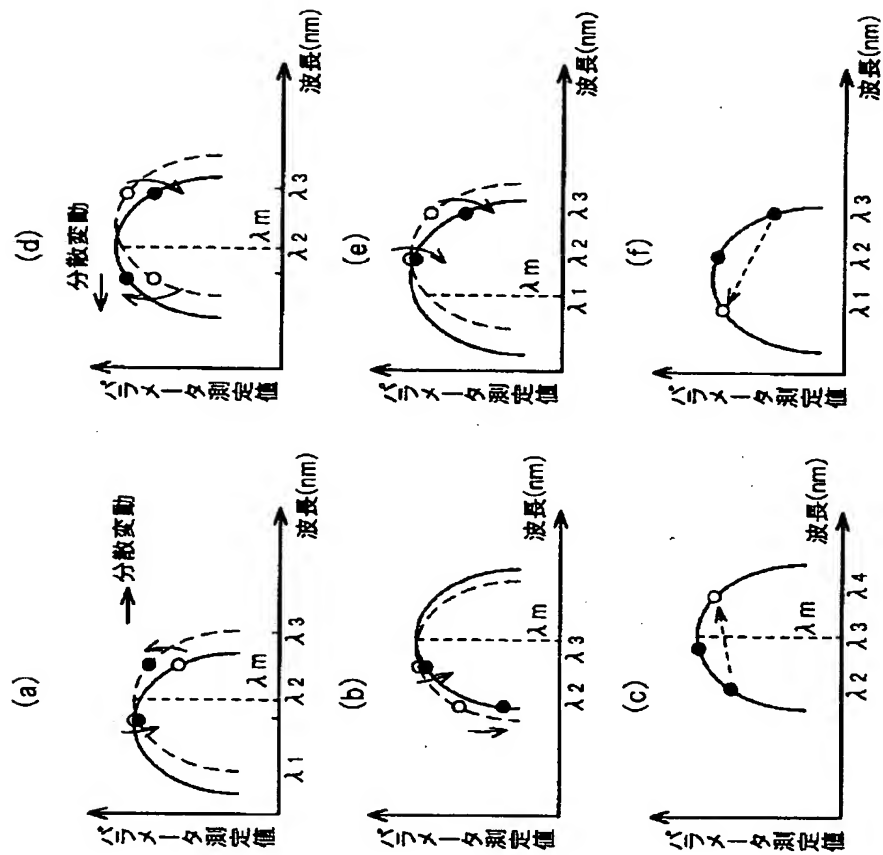
【図75】

波長分散特性 (シミュレーション値)



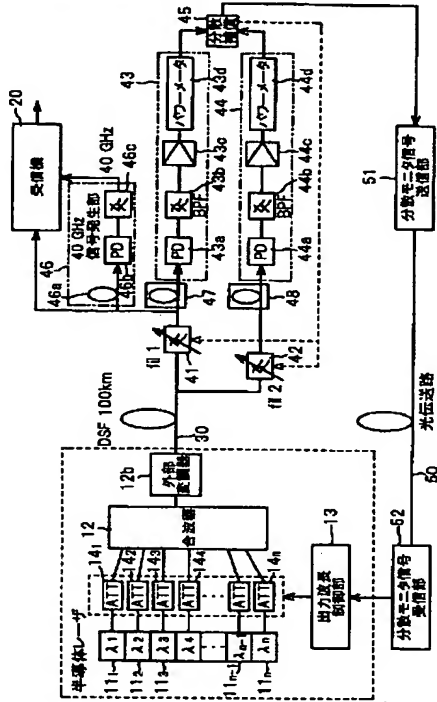
【図54】

強度最大波長の変動方向説明図



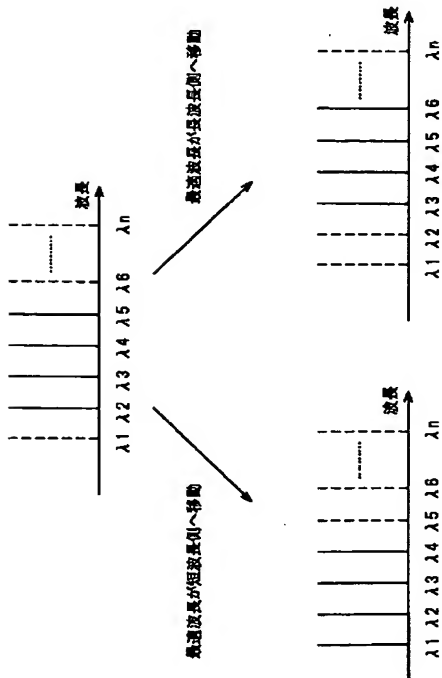
【図56】

強度最大波長を検出して主信号光の切替を制御する光伝送システム



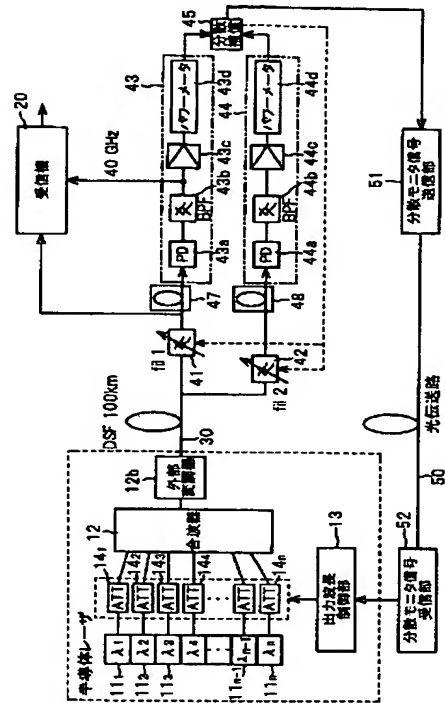
【図68】

4波多重する場合の説明図



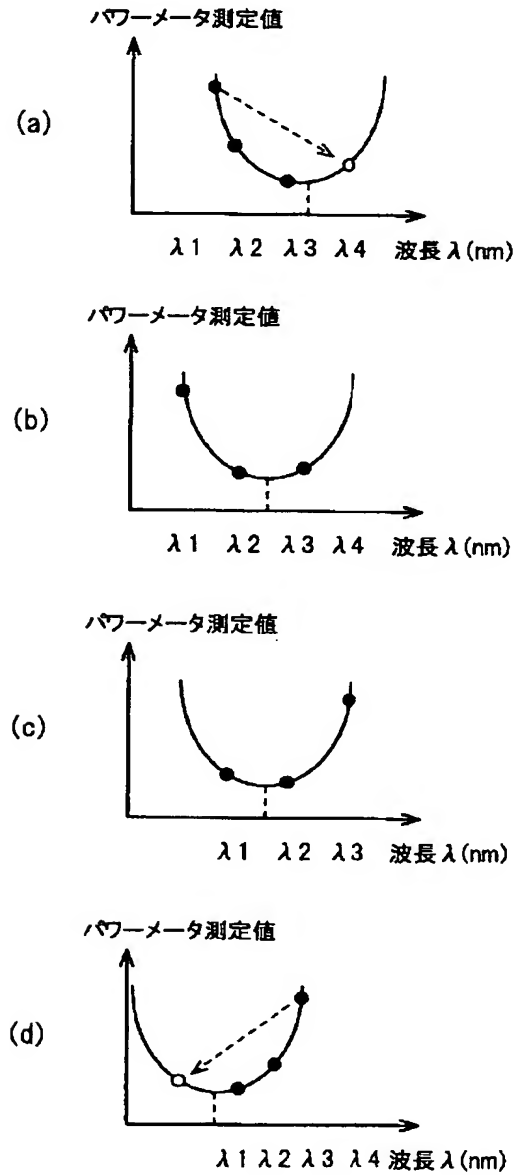
【図57】

強度最大波長を検出して主信号光の切替を制御する光伝送システムの変形例

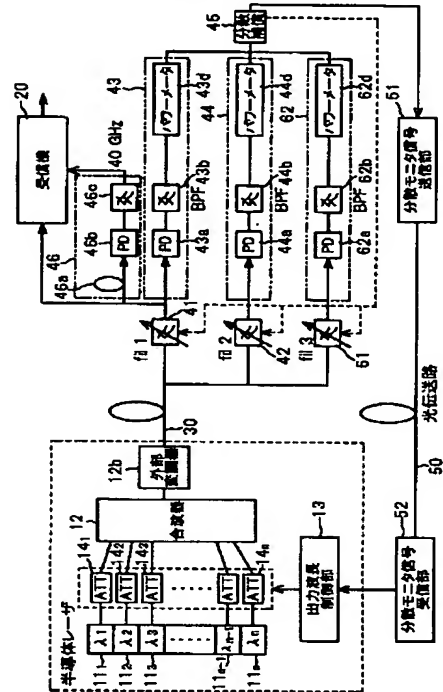


【図59】

最適波長検出に3波用いる場合

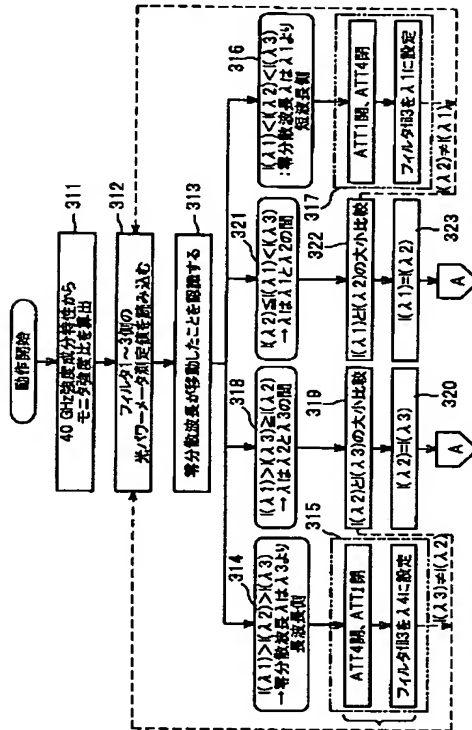


【図60】

主信号光と2つのモニタ光の3波を用いて
波長分散補償する光伝送システムの構成

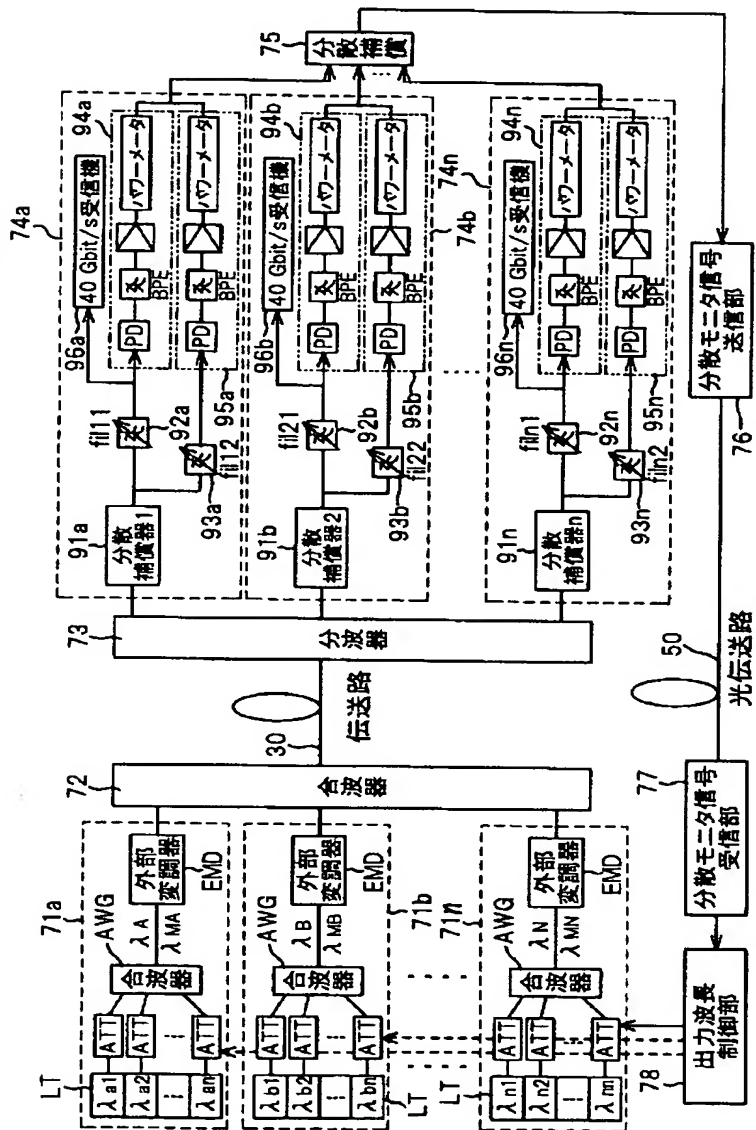
【图62】

3波用いる場合における波長分散補償処理 (モニタ光切替、主波長切替指示)



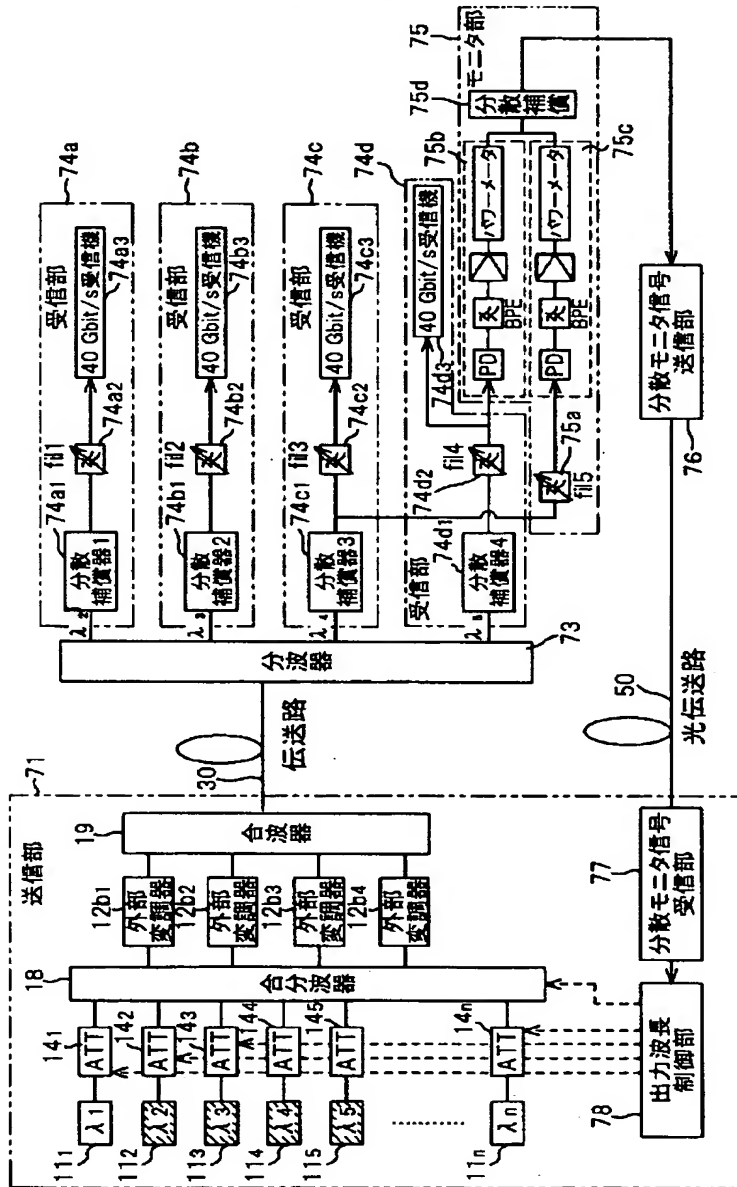
【図65】

波長多重構成(n波長多重)



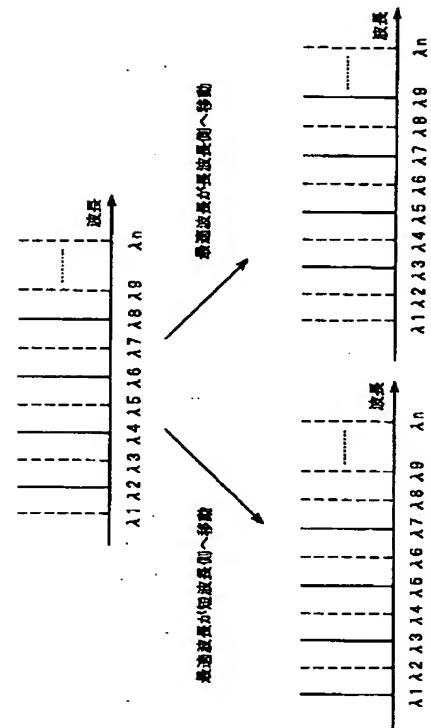
【図67】

4波多重する場合の構成



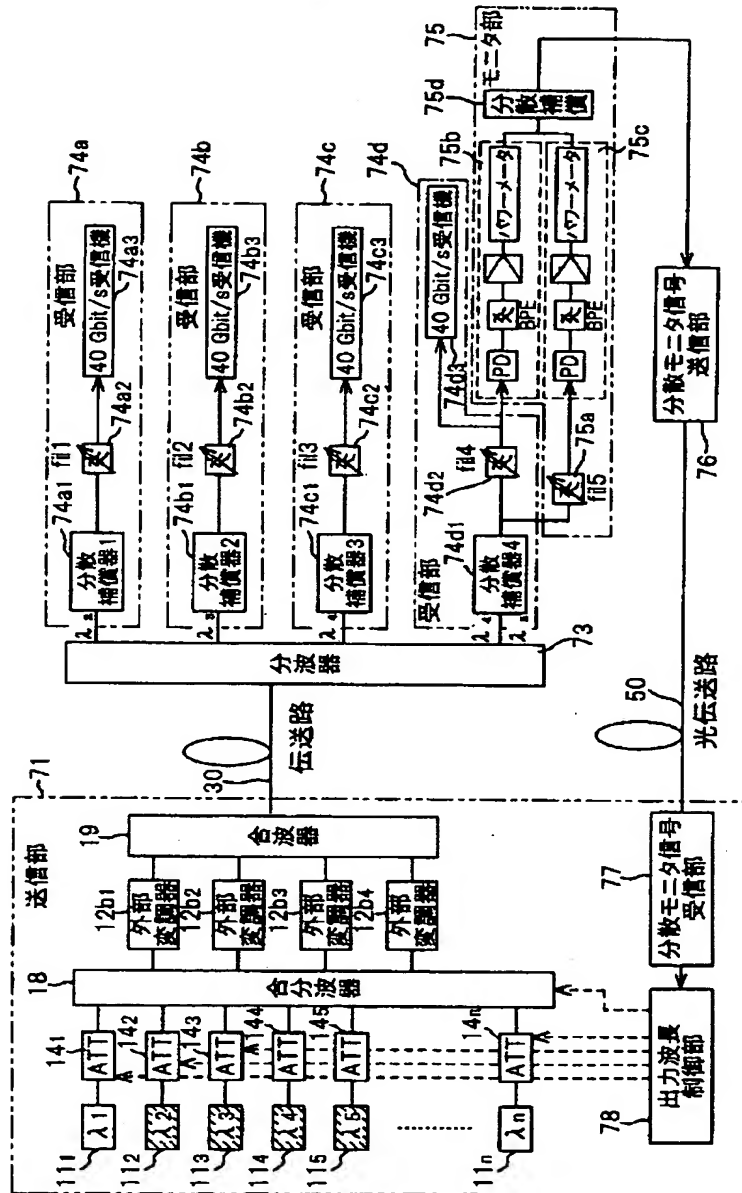
【図71】

4波多重の説明図



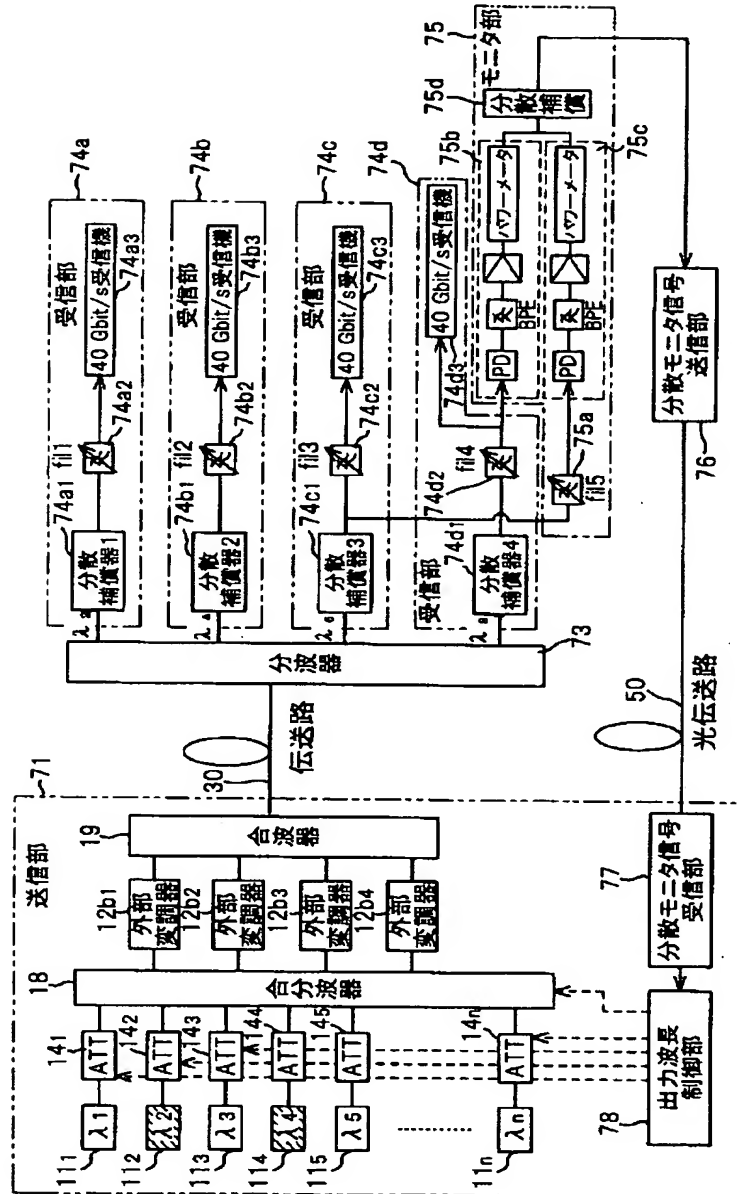
【図69】

4波多重する場合の構成



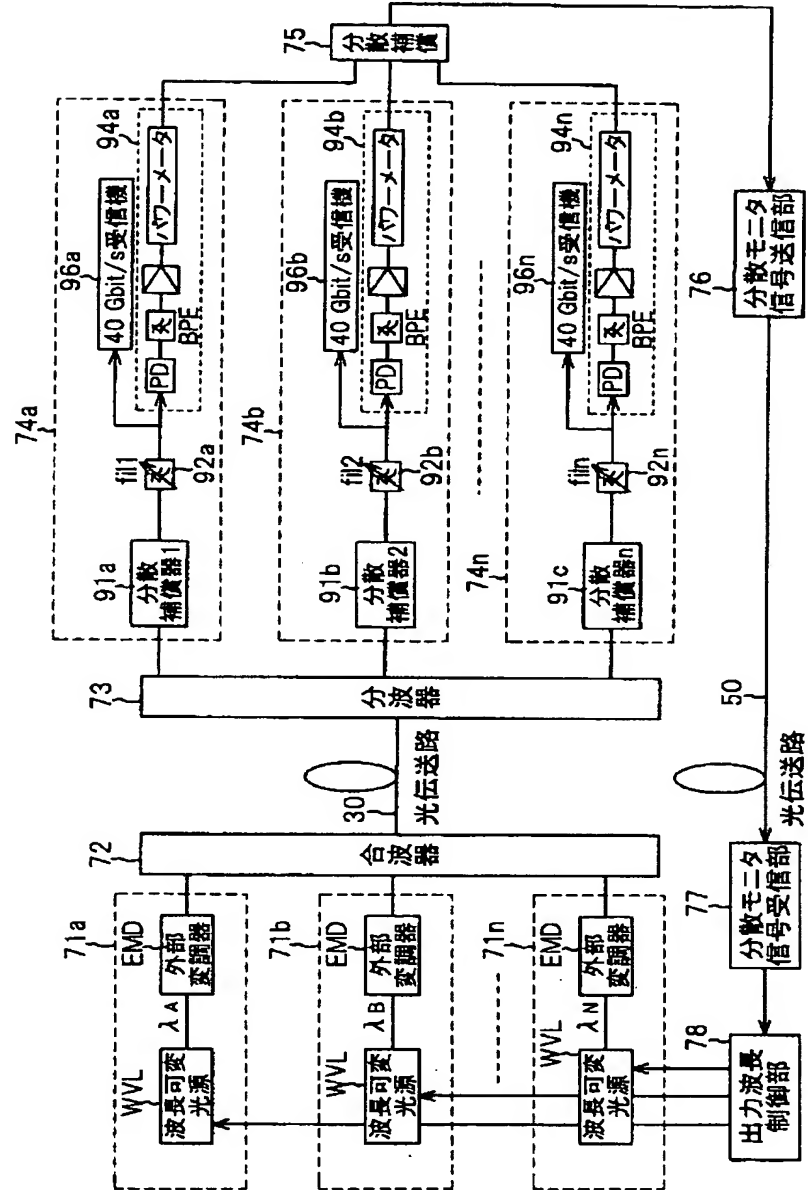
【図70】

4波多重する場合の構成



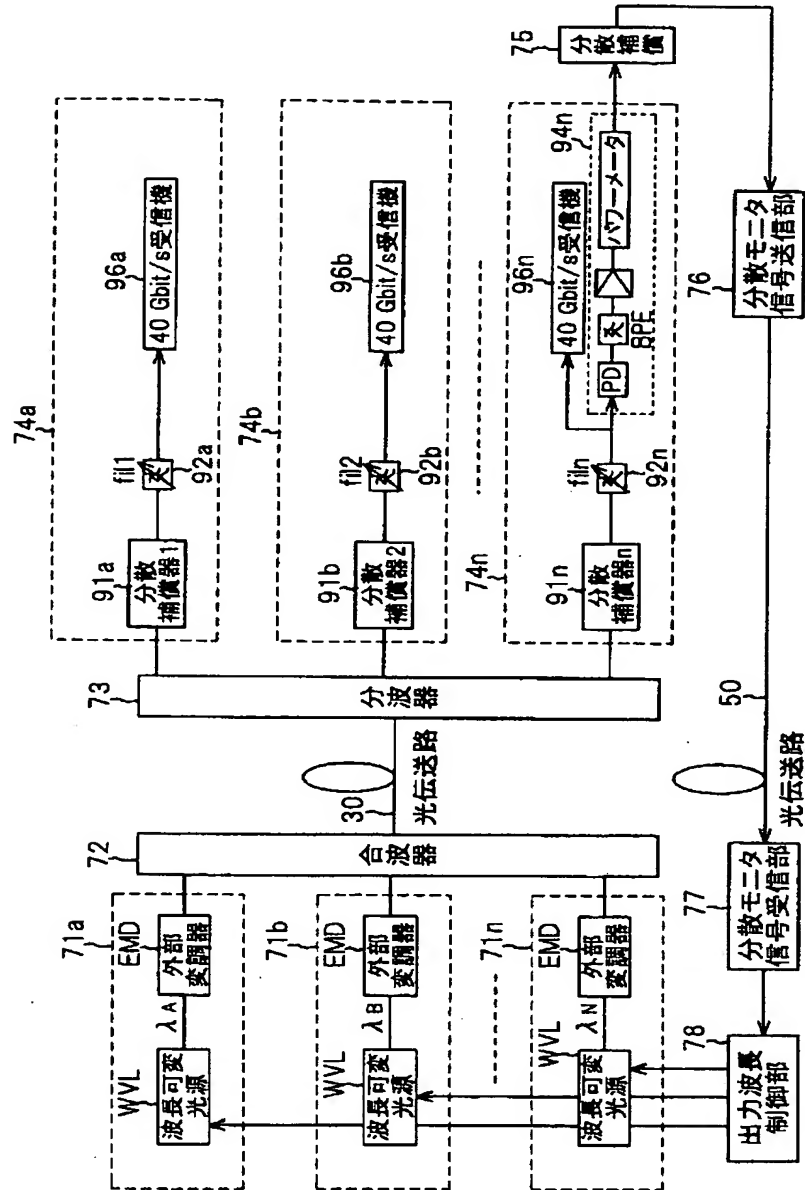
【図72】

波長可変光源を用いた第3実施例の波長多重構成



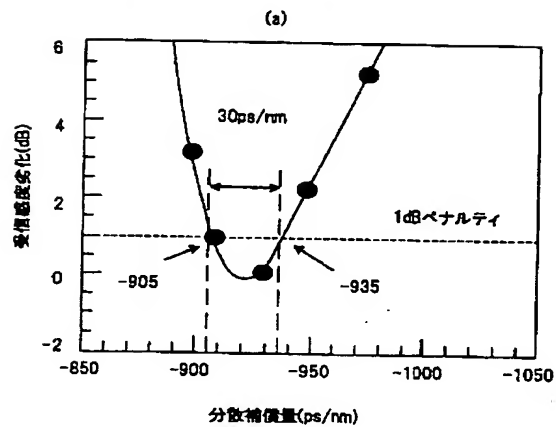
【図73】

波長可変光源を用いた第3実施例の波長多重構成の変形例

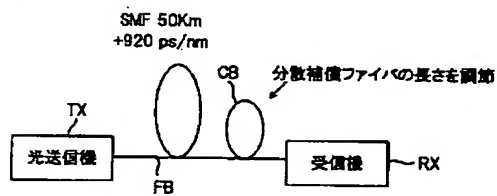


【図74】

40Gb/s 1.3 μ m 零分散SMF 50km 伝送実験における
分散補償量とパワーペナルティの関係

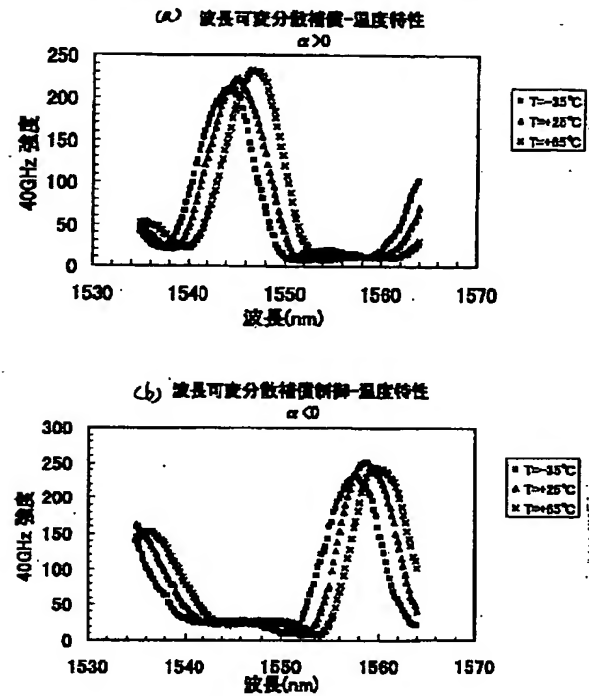


<測定系>



【図77】

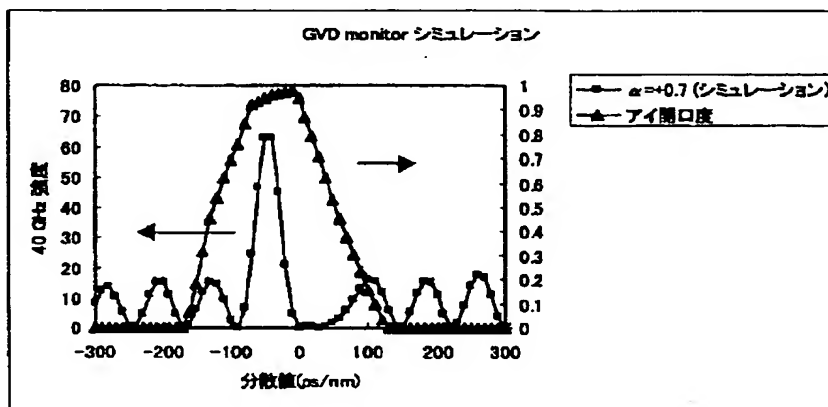
40Gb/s NRZ信号での分散量 対 40 GHz成分強度 温度特性 (実験値)



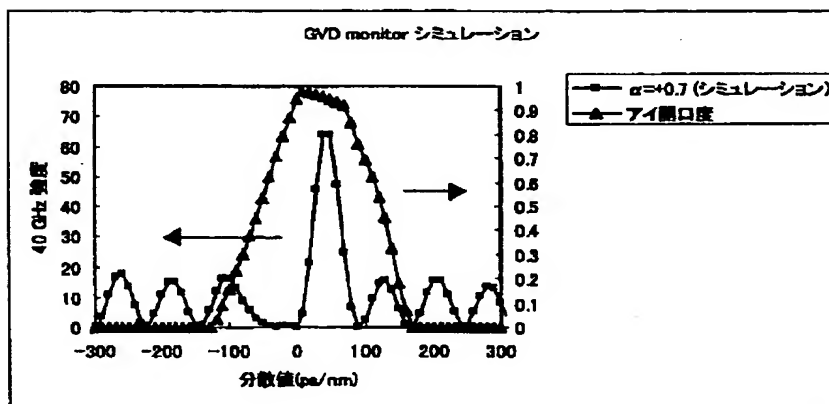
【図76】

40Gb/s NRZ信号での分散量 対 40 GHz成分強度、アイ開口度 (シミュレーション値)

(a) $\alpha > 0$



(b) $\alpha < 0$



フロントページの続き

(72)発明者 大井 寛己
神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
1号 富士通株式会社内

(72)発明者 近間 輝美
神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
1号 富士通株式会社内
Fターム(参考) 5K002 AA01 BA05 CA01 CA09 CA10
DA02 FA01